



Segmentation et classification des images satellitaires : application à la détection des zones d'upwelling côtier marocain et mise en place d'un logiciel de suivi spatiotemporel

Ayoub Tamim

► To cite this version:

Ayoub Tamim. Segmentation et classification des images satellitaires : application à la détection des zones d'upwelling côtier marocain et mise en place d'un logiciel de suivi spatiotemporel . Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. UNIVERSITÉ MOHAMMED V FACULTÉ DES SCIENCES Rabat 2015. Français. NNT : . tel-01242495

HAL Id: tel-01242495

<https://inria.hal.science/tel-01242495>

Submitted on 12 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre : 2793

Thèse de Doctorat

Présentée par

Ayoub TAMIM

Titre

Segmentation et classification des images satellitaires : application à la détection des zones d'upwelling côtier marocain et mise en place d'un logiciel de suivi spatio- temporel

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Informatique et Télécommunications

Soutenue le 22/09/2015, devant le jury composé de :

Président :

Driss ABOUTAJDINE

PES, FSR, Rabat.

Examineurs :

Abdellah ADIB

PES, FST, Mohammedia.

Nadia BERDAY

PES, IAV Hassan II, Rabat.

Khalid MINAOUI

PH, FSR, Rabat.

Khalid DAOUDI

Chargé de Recherches,
INRIA, Bordeaux, France.

Hussein YAHIA

Chargé de Recherches,
INRIA, Bordeaux, France.

Invité :

Abderrahman ATILLAH

Docteur, CRTS, Rabat.



AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre du projet de coopération "PHC VOLUBILIS 2011" entre le Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications (LRIT) à la Faculté des Sciences de Rabat (FSR), le Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS, Rabat) et l'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA, Bordeaux, France), sous la direction de Mr. Driss ABOUTAJDINE et le co-encadrement de Mr. Khalid MINAOUI, Mr. Khalid DAOUDI et Mr. Abderrahman ATILLAH.

C'est avec la plus profonde gratitude que je souhaite remercier vivement mon directeur de thèse Mr. Driss ABOUTAJDINE, professeur d'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, directeur du laboratoire LRIT et directeur du Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST). Je lui exprime ma profonde gratitude de m'avoir accepté au sein du laboratoire LRIT et d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

Merci aussi à mon co-encadrant Mr. Khalid MINAOUI, professeur habilité à la Faculté des Sciences de Rabat, de la qualité et la complémentarité de son encadrement et pour ses précieux conseils scientifiques. Je le remercie également d'avoir accepté d'examiner mon travail et de participer en tant qu'examineur dans le jury final.

Je voudrais également exprimer toute ma reconnaissance à Mr. Khalid DAOUDI, chargé de Recherches à l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique de Bordeaux, France. Je le remercie de m'avoir accueilli au sein de l'équipe GeoStat et de m'offrir, de tout point de vue, les meilleures conditions de travail possibles. Je le remercie également d'avoir accepté d'examiner mon travail et de participer en tant qu'examineur dans le jury final.

Je remercie sincèrement Mr. Hussein YAHIA, chargé de recherche et responsable de l'équipe GeoStat à l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique de Bordeaux, pour sa grande disponibilité, ses grandes qualités scientifiques, ainsi que pour sa participation au jury en tant qu'examineur.

Travailler au Centre Royal de Télédétection Spatiale a été très agréable et enrichissant et je tiens à remercier pour cela Mr. Abderrahman ATILLAH, qui a contribué à créer cette atmosphère. De plus, je le remercie pour sa modestie et son intérêt porté à mes travaux. Je le remercie également d'avoir accepté de participer au jury final en tant qu'invité.

Je tiens à remercier Mr. Abdellah ADIB, professeur de l'enseignement supérieur à Faculté des sciences et techniques de Mohammedia, d'avoir accepté de juger la qualité de mon travail et de participer au jury final en tant que rapporteur.

Je tiens à remercier Mme. Nadia BERDAY, professeur de l'enseignement supérieur, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II de Rabat, d'avoir accepté de rapporter ce travail et de

participer au jury final en tant que rapporteur.

Merci à mes parents pour leur confiance inconditionnelle, pour leur soutien de tous les instants et pour leurs encouragements. Merci à mes deux frères pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour mes travaux. Qu'ils sachent combien ils sont importants pour moi. Merci enfin à tous les membres de ma famille pour leur soutien et pour leur affection. Je tiens également à associer à ces remerciements l'ensemble de ma grande famille et de mes amis et collègues pour m'avoir soutenu pendant tout ce temps, s'ils ne peuvent pas être tous cités ici ils se reconnaîtront.



RÉSUMÉ

La connaissance des systèmes d'upwelling est d'un grand intérêt pour nombre d'applications géophysiques et océanographiques. Les images satellites acquises en temps réel permettent d'avoir une surveillance continue de l'espace maritime, notamment dans le domaine thermique et visible délivrant des informations respectivement sur la distribution des températures à la surface de la mer et sur la couleur de l'eau. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la caractérisation et l'étude du phénomène d'upwelling, à partir des images de température de surface de la mer, qui est à l'origine de la formation de nombreuses structures océaniques, telles que les fronts thermiques, les filaments, les méandres, et les tourbillons. Le but est d'améliorer les interprétations visuelles des images par des océanographes qui restent souvent subjectives.

La démarche proposée consiste à relier les problèmes de détection des structures thermiques dans les eaux côtières d'upwelling à des concepts théoriques de traitement d'images et de vision par ordinateur. Il s'agit notamment d'utiliser des méthodes de segmentation. Par ailleurs, des méthodes de traitement d'images non linéaires, basées sur des concepts de physique statistique et de thermodynamique, ont été utilisées pour la mise en évidence de la turbulence océanographique caractérisant le régime chaotique des phénomènes complexes marins. Ainsi, les points de singularités détectés dans les images infrarouges, en utilisant le formalisme multifractal microcanonique, contiennent des informations clés à la compréhension de ces notions de turbulence et d'intermittence océanique.

Ensuite, un applicatif de calcul d'indices d'upwelling est mise à la disposition des utilisateurs afin d'extraire et de suivre l'évolution de l'intensité et de l'extension d'upwelling sur la côte marocaine. Cet applicatif permet de suivre à la fois en temps réel et d'analyser les séries temporelles des variations de ce phénomène.

Enfin, une étude statistique a permis de faire un suivi de la variabilité saisonnière de l'intensité de l'upwelling sur la côte atlantique marocaine tout en mettant en évidence les caractéristiques spatio-temporelles de ce phénomène via des indices établis à cet effet. Cette analyse a permis de mettre en évidence les zones de forte activité d'upwelling et les poids des processus à l'origine du phénomène d'upwelling.

Mots clés : *Segmentation et classification ; Traitement du signal non linéaire ; Formalisme multifractal microcanonique ; Exposants de singularités ; Images satellitaire ; Upwelling côtier marocain ; Fronts thermiques.*



ABSTRACT

The knowledge of the upwelling systems is very important for many applications in geophysical and oceanographic. The remotely sensed images acquired in real time allow to conduct continuous space maritime monitoring, especially in thermal and visible range, which provide information about the temperature distribution in the sea surface and the ocean colour. In this work, we are interested on the study of the upwelling phenomenon using the sea surface temperature images which is considered to be the origin of the formation of many ocean structures, such as thermal fronts, filaments, meanders and eddies. The main aim is to improve the visual interpretations of the satellite images made by the oceanographers.

The proposed approach is based on the segmentation and detection of the thermal mesoscale structures in coastal upwelling waters using several methods in image processing and computer vision. In addition, the images processing methods based on the statistical physics and thermodynamics concepts were also used for the purpose of highlighting the turbulent and complex character of the marine phenomena. In this sense, the singularities points detected in infrared images, using the Microcanonical Multifractal Formalism, contain key information to understanding intermittency and oceanic turbulence.

A computational software system for the calculation of the upwelling index is made available for users in orders to extract and monitor the intensity and extension of upwelling along the Moroccan Atlantic coast. This application allows providing users continually by space synthetic products informing about environmental parameters and permitting to evaluate and to survey the coastal upwelling dynamic in space and time.

Finally, a statistical study has been conducted in order to monitor the seasonal variability of the upwelling intensity along the Moroccan Atlantic coast by using well-established upwelling indices and consequently highlight the areas of high upwelling activity.

Keywords : *Segmentation and classification ; Nonlinear Signal Processing ; Microcanonical Multiscale Formalism ; Singularity exponents ; Remote sensing images ; Moroccan Coastal Upwelling ; Thermal fronts.*



LISTE DES ACRONYMES

SST	Sea Surface Temperature
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NASA	National Aeronautics and Space Administration
TIROS	Television Infrared Observation Satellite
TSM	Température de Surface de la Mer
CRTS	Centre Royal de Télédétection Spatial
HRPT	High Resolution Picture Transmissions
MVC	Maximum Value Composite
TCD	Turbulence complètement Développée
FMM	Formalisme Multifractal Microcanonique
MSM	Most Singular Manifold
INRH	Institut Nationale de Recherche Halieutique
MatLab	Matrix Laboratory
FCM	Fuzzy c-means
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
EdS	Exposants de singularité
GK	Gustafson-Kessel



TABLE DES MATIÈRES

Résumé	iii
Abstract	1
Liste des acronymes	1
Liste des figures	10
Liste des tableaux	12
Chapitre 1 : Introduction	13
1.1 Intérêts de l'imagerie satellitaire pour l'étude du phénomène d'upwelling	13
1.2 Traitements d'images infrarouges et analyse des structures océaniques	14
1.3 Présentation méthodologique de l'approche proposée	14
1.4 Plan du document	15
1.5 Publications	16
Chapitre 2 : Acquisitions satellitaires et étude du phénomène d'upwelling : application à la côte atlantique marocaine	18
2.1 Images du satellite NOAA/AVHRR	18
2.1.1 Image satellitaire	18
2.1.2 Mesures radiométrique	18
2.1.2.1 Rayonnement visible	19
2.1.2.2 Rayonnement infrarouge	19
2.1.3 Satellite NOAA et capteur AVHRR	20
2.1.4 Image de température de surface de la mer	21
2.1.4.1 Chaîne de prétraitement des données de la TSM	22
2.1.4.2 Produit synthèse temporelle de TSM	23
2.1.5 Extraction de la zone d'intérêt et mise en place de la base de données d'étude	24
2.2 Upwelling marocain : phénomène marin des eaux côtières aux structures complexes	25

2.2.1	Pourquoi l'analyse et le suivi de l'upwelling ?	25
2.2.2	Définition de l'upwelling côtier	27
2.2.3	Processus et facteurs à l'origine du phénomène d'upwelling le long des côtes atlantiques du Maroc	28
2.2.4	La distribution géographique de l'upwelling le long des côtes atlantiques du Maroc	30
2.2.5	La répartition et la nature des structures thermiques de l'upwelling le long des côtes atlantiques du Maroc	31
2.2.5.1	Répartition des eaux froides et des eaux chaudes	31
2.2.5.2	Fronts thermiques associés à l'upwelling	31
2.3	Conclusion	35

Chapitre 3 : Segmentation et classification des images infrarouges pour la détection des structures thermiques 36

3.1	Techniques de segmentation : Etat de l'art	36
3.1.1	Segmentation d'images	36
3.1.2	Segmentation par approche contour	38
3.1.3	Segmentation par approche région	41
3.1.4	Segmentation par approche hybrides	42
3.1.5	Discussion	46
3.2	Classification automatique des zones d'upwelling	46
3.2.1	Paramètres de classification	46
3.2.2	Méthodes de classification	48
3.2.2.1	Clusters	49
3.2.2.2	Partitionnement	49
3.2.3	Application à la détection des zones d'upwelling	50
3.2.3.1	Algorithme de K-means	50
3.2.3.2	Algorithme d'Otsu	51
3.2.3.3	Algorithme c-moyenne floue 'Fuzzy c-means'	52
3.2.3.4	Algorithme de Gustafson-Kessel	53
3.2.3.5	Détermination du nombre optimal de classes ou 'cluster validity'	54
3.2.3.6	Combinaison des méthodes de classification pour la segmentation des régions d'upwelling	57
3.3	Analyse des résultats et discussion	58
3.4	Conclusion	59

Chapitre 4 : Formalisme multifractal pour l'analyse et la détection des structures océaniques à méso-échelles 61

4.1	Intérêt du formalisme multifractal dans l'étude et l'analyse des images de la TSM	61
4.2	Exposants de singularité pour la détection des fronts thermiques	62
4.3	Extraction de la variété la plus singulière	63
4.4	Extraction des fronts thermiques	64
4.5	Analyse des résultats et discussion	65

4.6 Conclusion	66
Chapitre 5 : Mise en place d'un applicatif pour la caractérisation et l'analyse spatio-temporelle de l'upwelling marocain	68
5.1 Principe et méthodes de calcul d'indice d'upwelling	68
5.2 Applicatif de calcul de l'indice d'upwelling	70
5.2.1 Configuration des radiales	71
5.2.2 Recherche des valeurs minimales et maximales de la TSM	71
5.2.3 Principaux Modules de l'applicatif	72
5.2.3.1 Module pour la détection de la zone occupée par les eaux d'upwelling	73
5.2.3.2 Module pour le calcul de l'indice d'upwelling	74
5.2.3.3 Résultats de sorties de l'applicatif	75
5.3 Création d'une Base de données pour le suivi et la compréhension de la variabilité spatio-temporelle de l'upwelling	77
5.3.1 Variation spatiale moyenne de l'upwelling	78
5.3.2 Variabilité temporelle (ex. 2007-2008)	79
5.3.3 Variation saisonnière de l'intensité et de l'extension spatiale de l'upwelling	79
5.4 Conclusion	81
Chapitre 6 : Conclusion générale et perspectives	83
Bibliographie	85

LISTE DES FIGURES

2.1	La répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leurs longueurs d'onde (UVED, 2008).	19
2.2	Satellites géostationnaire (<i>G</i>) et satellites à orbite polaire (<i>PO</i>) (EOEdu, 2010) .	20
2.3	Répartition des canaux du capteur AVHRR en fonction de la longueur d'onde (MeteoFrance, 2010).	21
2.4	Domaine couvert par les images TSM	25
2.5	Masque utilisé pour sélectionner les images de la TSM	26
2.6	Circulation verticale lors d'un upwelling côtier (Wikimedia, 2011).	27
2.7	Schéma de formation de l'upwelling et de downwelling par les vent le long du littoral atlantique marocain.	29
2.8	Action du vent sur l'océan : le transport de la couche d'Ekman est perpendiculaire au vent, à droite dans l'hémisphère nord, à gauche dans l'hémisphère sud (Eduscol, 2006).	30
2.9	L'évolution saisonnière de l'upwelling côtier marocaine dans l'année 2007. . .	32
2.10	Image TSM obtenue le 2007-01-02, représentant la répartition des températures de surface sur la partie sud de la côte atlantique Marocaine.	33
2.11	Détection des structures thermiques dans l'image de TSM de la Fig. 2.10. Illustration des différentes structures océaniques à submésoséchelles présentes le long de la côte atlantique marocaine.	33
3.1	Images TSM utilisées tout au long de ce travail afin de tester les différentes techniques de segmentation. De gauche à droite : images obtenus le 2007-01-02, le 2008-12-45, et le 2007-08-16.	37
3.2	Différents types de contours : marche d'escalier, toit et pointe.	38
3.3	Détection des contours par l'application de la norme du gradient sur respectivement les images de la Fig. 3.1.	39
3.4	Détection des contours sur les images de la Fig. 3.1. De haut en bas : norme du gradient de Roberts, norme du gradient du Prewitt et norme du gradient de Sobel.	40
3.5	Détection des contours par l'application de l'opérateur de Kirsh sur respectivement les images de la Fig. 3.1.	40
3.6	Détection des contours par l'application de l'opérateur de Canny sur respectivement les images de la Fig. 3.1.	41

3.7	Extraction de la région d'upwelling en utilisant la méthode d'accroissement de régions sur respectivement les images de la Fig. 3.1. Les points rouges représentent grossièrement les pixels qui servent de points de départ ; ces points sont choisis par un expert océanographe en se basant sur les connaissances techniques et scientifiques à priori de notre région d'étude.	42
3.8	Segmentation en 7 classes par classification sur l'espace de luminance en utilisant l'algorithme k -means sur respectivement les images de la Fig. 3.1.	43
3.9	Résultat du processus de diffusion non-linéaire de Perona et Malik permettant de détecter les pixels appartenant à des contours sur respectivement les images de la Fig. 3.1.	44
3.10	Gradient morphologique sur les images originales de la Fig. 3.1.	45
3.11	Segmentation en 7 classes par seuillage sur l'espace de luminance en utilisant l'algorithme d'Otsu sur les images de la Fig. 3.1.	51
3.12	Segmentation en 7 classes sur l'espace de luminance en utilisant l'algorithme de classification floue (fuzzy c-means) sur les images de la Fig. 3.1.	53
3.13	Segmentation en 7 classes sur l'espace de luminance en utilisant l'algorithme de classification floue Gustafson-Kessel sur les images de la Fig. 3.1.	54
3.14	Détection automatique du nombre de classes par l'application du processus de fusion entre les clusters. De gauche à droite : les clusters optimaux trouvés pour les images de la Fig. 3.1 sont respectivement 3, 5 et 6.	55
3.15	Détermination du nombre optimal de classes pour les 2 premières images de la Fig. 3.1. Première ligne : Utilisation de la méthode d'Otsu et les indices de validation Davies-Bouldin et Dunn. Deuxième ligne : Utilisation de la méthode FCM et les indices de validation Xie-Beni et Fukuyama-Sugeno.	56
3.16	Détection automatique de la zone d'upwelling. De gauche à droite : image TSM ; classification sur 2 classes en utilisant la méthode d'Otsu ; seuillage binaire pour la détermination de la zone d'upwelling.	57
3.17	Extraction de la zone d'upwelling par l'application de la méthode d'accroissement de région. De gauche à droite : image TSM, extraction de la zone d'upwelling et élimination des structures fines du large, délimitation automatique de la zone d'upwelling.	58
3.18	Evaluation qualitative, faite par un océanographe, de la méthode de segmentation Otsu en utilisant 70 images de la TSM.	59
4.1	Situation du 2007-01-02, (Fig. 3.1). Extraction des ensembles les plus singuliers. De gauche à droite : images TSM originales ; MSM extraites à une densité autour de $d_{\infty} = 35\%$; superposition de l'image de MSM sur l'image originale.	64
4.2	Situation du 2007-01-02 (Fig. 3.1). Extraction des ensembles les plus singuliers. De gauche à droite : images TSM originales ; MSM extraites à une densité autour de $d_{\infty} = 35\%$ avec l'application du masque de nuages afin d'écarter les pixels non désirables ; superposition de l'image de MSM sur l'image originale.	64

4.3	Situation du 2007-01-02 (Fig. 3.1). Extraction des ensembles les plus singuliers. De gauche à droite : images TSM originales ; utilisation de la MSM avec application d'un masque de nuage toute en masquant les contours avec une longueur minimale ; superposition de l'image de MSM sur l'image originale.	65
4.4	Situation du 2007-01-02 (Fig. 3.1). Extraction de la variété la plus singulière. De gauche à droite : images TSM originales ; utilisation de la MSM avec application d'un masque de nuage toute en masquant les contours avec une longueur minimale.	66
4.5	Evaluation qualitative réalisée par un océanographe sur les résultats obtenus par l'application de l'algorithme de la MSM et l'algorithme de Oram et al. sur 92 images de TSM.	67
5.1	Le vent soufflant parallèlement à la côte, les masses d'eau de surface sont déviées vers la droite (transport d'Ekman). Cette divergence est alimentée par la remontée d'eau de sub-surface (UVED, 2006).	69
5.2	Exemple de profil zonal de TSM le long d'une radiale en cas de présence d'upwelling (Atillah et al., 2005).	70
5.3	Configuration oblique des radiales pour la prise en considération de l'effet du plateau continental (Atillah et al., 2005).	71
5.4	Situation du 2007-01-02, (Fig. 3.1). Exemples de front thermique délimitant le champs de recherche du minimum et du maximum de température le long de chaque radiale pour la partie sud du Maroc.	72
5.5	Architecture de l'applcatif de calcul d'indice d'upwelling contenant deux modules : I) segmentation de l'upwelling et II) calcul de l'indice d'upwelling. . . .	73
5.6	Interface graphique de l'applcatif integrant le module de délimitation de l'aire d'upwelling et le module de calcul de l'indice d'upwelling.	74
5.7	Exemple de résultats de segmentation d'image TSM (module I de l'applcatif). De gauche à droite : images du 2007-07-26 après affichage par le bouton 'Display Image' ; Segmentation en utilisant le Module I de l'applcatif et affichage en utilisant le bouton 'Display Upwelling Fronts' (Fig. 5.6).	75
5.8	Exemple de sortie ASCII (.xls) de l'applcatif appliqué à la deuxième synthèse hebdomadaire de l'année 2007 (le nombre de radiales est de 1573).	76
5.9	Evolution spatiale moyenne des indices d'upwelling (2007-2008).	77
5.10	Variation temporelle de l'upwelling le long des côtes marocaines (2007-2008). .	78
5.11	Variabilité saisonnière de l'intensité de l'upwelling (2007-2008).	80
5.12	Variabilité saisonnière de l'extension de l'upwelling (2007-2008).	81



LISTE DES TABLEAUX

2.1	Caractéristiques des images TSM couvrant toute la côte atlantique marocaine .	24
2.2	Caractéristiques des images TSM couvrant la partie sud de la côte atlantique marocaine	25

Le travail présenté dans cette thèse vise à utiliser des méthodes et outils spécifiques au traitement d'image et à la vision par ordinateur pour analyser les structures thermiques du phénomène d'upwelling sur la côte atlantique marocaine évidentes ou dissimulées sur les images de température de surface de la mer (TSM). L'objectif escompté est d'exploiter les données de l'observation spatiale et l'élaboration de produits opérationnels à partir des images thermiques de surface de la mer pour la caractérisation de l'upwelling côtier marocain et le suivi de sa dynamique spatiale et temporelle.

1.1 Intérêts de l'imagerie satellitaire pour l'étude du phénomène d'upwelling

Depuis l'avènement des tous premiers satellites de télédétection spatiale à la fin des années 1950, le développement des capteurs et des plateformes satellitaires a connu une prolifération et une croissance rapides. En effet, la demande croissante des produits satellitaires combinée avec le développement rapide des ordinateurs, des outils de traitement d'image et des moyens de stockage de l'information a changé notre vision sur les produits acquis par satellites. Ainsi, de nos jours, l'imagerie satellitaire constitue un moyen incontournable pour plusieurs applications : océanographique, météorologique, hydrologique, agricole, climatologique, urbanistique ...

Dans le cadre de l'étude des phénomènes océanographiques, une meilleure connaissance de la dynamique et de la circulation océanique passe par une meilleure compréhension des nombreux mécanismes mis en jeu dans l'océan. Une des tâches importantes dévolues aux océanographes est notamment l'analyse des systèmes d'upwelling des bordures côtières des océans. Ces systèmes sont à l'origine de fortes structures océaniques susceptibles d'engendrer de fortes altérations dans la distribution de la couche euphotique, favorisant une grande fluctuation des ressources halieutiques. En effet, 25% du stock mondial de poissons est capturé dans les quatre principaux courants d'écosystèmes d'upwelling (le courant des Canaries, le courant du Benguela, le courant du Humboldt et le courant de la Californie), représentant plus de 5% de la surface totale des océans (Jennings et al., 2001).

La détection et le suivi du phénomène d'upwelling constitue un enjeu économique majeur dans la mesure où il est la principale source d'enrichissement des écosystèmes côtiers. A cet effet, et eu égard à l'insuffisance et la discontinuité des mesures in-situ, l'imagerie satellite constitue une source d'information indispensable permettant la mise en évidence des structures mésoéchelles composant l'aire d'upwelling. Par ailleurs, l'analyse du phénomène d'upwelling requiert, compte tenu de sa grande variation temporelle et spatiale, un système de suivi continu

que seules les images thermiques acquises par des satellites peuvent le permettre. En effet, les capteurs infrarouges fournissent de nombreuses informations pertinentes sur les grandeurs thermodynamiques et physiques de l'océan tout en informant sur la répartition de la température de surface de la mer, et les structures océaniques à submésoséchelle dans les zones d'upwelling. Néanmoins, pour accéder à ces différentes structures et déterminer les zones de forte activité d'upwelling, il est indispensable de recourir à un certain nombre de méthodes et d'outils de traitement automatique d'image.

1.2 Traitements d'images infrarouges et analyse des structures océaniques

Le traitement d'images a pour but d'analyser et de transformer les images numériques pour améliorer leur qualité et d'en extraire les informations pertinentes souvent dissimulées pour un observateur. A cet effet, l'utilisation des techniques de traitement d'image et de vision par ordinateur constitue un outil efficace pour l'analyse de ces images. Ces techniques sont largement exploitées dans le traitement des images naturelles et en particulier dans la détection, le suivi et l'analyse des phénomènes océaniques, tels que l'upwelling, à partir des images de température de surface de la mer (Holyer and Peckinpaugh, 1989; Cayula and Cornillon, 1992; Simhadri et al., 1998).

Néanmoins, la majorité des techniques développées en traitement d'images s'avèrent limitées pour le traitement de données naturelles telles que les images acquises par des capteurs infrarouges. En effet, un grand nombre de méthodes de traitement d'image ne prend pas en compte la physique de la turbulence pourtant accessible par l'acquisition infrarouge ; cependant, dans le cas de l'étude de l'upwelling ou d'autres phénomènes de dynamique océanique, la nature turbulente du phénomène observé est de première importance et influe fortement sur les algorithmes qui extraient les structures géométriques auxquelles on s'intéresse dans ce cas. En particulier, les images de température de surface de la mer renseignent sur les structures cohérentes observées dans un fluide turbulent, l'océan (Nieves et al., 2007).

La valeur du nombre de Reynolds dans l'océan indique que l'on est en présence du phénomène de turbulence pleinement développée, responsable de l'apparition de structures cohérentes très complexes en général non atteignables par les algorithmes standards de traitement d'image, qui reposent sur des hypothèses de linéarité et de stationnarité (convolution avec une réponse impulsionnelle), alors que la complexité observée provient directement du caractère non-linéaire des équations de Navier-Stokes.

1.3 Présentation méthodologique de l'approche proposée

La démarche adoptée dans ce travail, consiste dans un premier temps à identifier, à partir des images de température de surface de la mer, les différentes structures thermiques de l'océan (i.e. fronts thermiques et filaments), caractérisant le phénomène d'upwelling, par des concepts de traitement d'image et de vision par ordinateur. Compte tenu de la nature chaotique et turbulente du fluide océanique, nous avons opté pour des méthodes de traitement d'image dérivées des concepts thermodynamiques et qui reposent sur des principes provenant de la physique statistique des systèmes complexes et turbulents.

Notre approche utilise fondamentalement la notion d'exposant de singularité (EdS) dans

une formulation microcanonique ainsi que le calcul précis de ces exposants, comme cela est montré dans (Turiet et al., 2008; Pont et al., 2013; Maji and Yahia, 2014; Yahia et al., 2010). Ces exposants permettent la détection et l'indentification précise des fronts thermiques (i.e. frontières de transitions entre les masses d'eau froides et chaudes) dans les images de TSM, correspondant aux transitions les plus singulières du signal, i.e. à ses contours. En effet, la multifractalité est une propriété caractéristique des systèmes turbulents et le formalisme multifractal constitue aujourd'hui l'outil de physique théorique le plus précis pour modéliser des écoulements fluides turbulents et complexes.

Un autre thème qui sous-tend notre recherche et qui détermine le choix de la méthode utilisée est la propriété d'intermittence. Celle-ci caractérise les données naturelles complexes (i.e. présentant des objets non artificiels acquis dans des conditions de luminance naturelles) et constitue la principale explication de leur nature chaotique (Frisch and Parisi, 1985; Castaing, 1996). Notons que cette propriété est souvent présente sur les images de température de surface de la mer, notamment dans les zones d'upwelling avec une variabilité et une intermittence marquées (Nieto et al., 2012; Marcello et al., 2005; Cayula and Cornillon, 1992). Dans ce sens, le formalisme multifractal nous permet ainsi de décrire complètement les images de TSM de l'échelle la plus grossière à l'échelle la plus fine et offre notamment une description de ces données en termes physique et géométrique, et permet ainsi d'extraire des structures pertinentes de ces deux points de vue.

La détection et la mise en évidence des différentes structures thermiques dans les images de TSM nous permettent d'effectuer une analyse spatio-temporelle de l'activité d'upwelling le long de la côte atlantique marocaine et de déterminer les principaux mécanismes contrôlant sa dynamique. On propose finalement un applicatif opérationnel et efficace permettant ainsi d'analyser et de suivre la variabilité spatiale et temporelle de l'upwelling sur des longues séries temporelles.

1.4 Plan du document

Ce travail est divisé en quatre chapitres, qui reprennent les étapes de notre démarche de recherche :

Un premier chapitre, présentera en détail le phénomène d'upwelling et les données de température de surface de la mer, utilisées comme base de travail, avec notamment la description de l'intérêt que présentent ces images. Par ailleurs, la problématique de la détection des structures thermiques et des zones d'upwelling dans la région côtière du Maroc sera discutée.

Le deuxième chapitre est consacré à la mise en application des différentes techniques de segmentation des images satellitaires, à la validation de ces méthodes, et à l'utilisation des outils de segmentation les plus adaptés aux exigences de notre problème (celui-ci est la détection des zones d'upwelling et de leurs structures). Il s'agit notamment des méthodes de classification automatique non-supervisée qui ont démontré une grande capacité à classer et segmenter les images de TSM.

Le troisième chapitre traite le modèle multifractal d'analyse d'image et son application à notre problématique. Il s'agit du formalisme multifractal microcanonique qui, à partir d'une étude des transitions les plus singulières du signal, permet une caractérisation à la fois géométrique et statistique des différentes structures observées dans l'image. L'approche multifractale

s'avère particulièrement adaptée aux données exhibant une structure complexe, à l'instar des images thermiques décrivant le phénomène d'upwelling.

En dernier lieu, nous présentons l'applicatif de calcul d'indices d'upwelling pour pouvoir suivre le phénomène des eaux froides dans le temps et dans l'espace. L'applicatif en question est une version améliorée d'un outil déjà existant, en lui intégrant de nouveaux paramètres, notamment les résultats obtenus par les méthodes de segmentation pour l'amélioration et l'adaptation des paramètres exigés pour ce calcul. L'applicatif exploite exclusivement les images de TSM, via une interface simple et conviviale, pour dériver un indice qui permet d'évaluer les variations de l'intensité de l'upwelling le long des côtes. Ensuite nous proposons un exemple d'interprétation des résultats de l'applicatif en terme d'évolution et de fluctuation temporelle (interannuelle, saisonnière et spatiale le long des côtes atlantiques du Maroc) de l'upwelling.

1.5 Publications

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont donné lieu aux publications suivantes :

Articles de journal :

- A. TAMIM, H. YAHIA, K. DAOUDI, K. MINAOUI, A. ATILLAH, D. ABOUTAJDINE, M. F. SMIEJ, "Detection of Moroccan Coastal Upwelling Fronts in SST Images using the Microcanonical Multiscale Formalism," *Pattern Recognition Letters*, Available online 30 January 2015, ISSN 0167-8655, <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2014.12.006>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167865515000021>).
- A. TAMIM, K. MINAOUI, K. DAOUDI, H. YAHIA, A. ATILLAH, and D. ABOUTAJDINE, "An efficient tool for automatic delimitation of Moroccan coastal upwelling using SST images, "An Efficient Tool for Automatic Delimitation of Moroccan Coastal Upwelling Using SST Images", *IEEE, Geoscience and Remote Sensing Letters*, volume 12, no.4, pages 875-879, April 2015.
- A. TAMIM, K. MINAOUI, A. ATILLAH, and D. ABOUTAJDINE, "On Fuzzy Clustering Algorithms for SST Satellite Images Segmentation," *European Journal of Remote Sensing*, en révision.
- A. TAMIM, K. MINAOUI, K. DAOUDI, H. YAHIA, A. ATILLAH, and D. ABOUTAJDINE, "Detection and Classification of Moroccan Mesoscale Structures Using Satellite SST Observations," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, en préparation.

Articles de conférence :

- A. TAMIM, K. MINAOUI, K. DAOUDI, A. ATILLAH and D. ABOUTAJDINE, "Detection of Moroccan Coastal Upwelling in SST images using the Expectation-Maximization", *1st International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, Fez, Morocco, 25-26 March 2015.
- A. TAMIM, K. MINAOUI, K. DAOUDI, A. ATILLAH, and D. ABOUTAJDINE, "On Detectability of Moroccan Coastal Upwelling in Sea Surface Temperature Satellite Images," *10th International Symposium on Visual Computing (ISVC)*, Las Vegas, Nevada, United States. Springer, LNCS, 8-10 December 2014.

- A. TAMIM, K. MINAOUI, K. DAOUDI, H. YAHIA, A. ATILLAH and D. ABOUTAJDINE, "Upwelling Detection in SST Images Using Fuzzy Clustering with Adaptive Cluster Merging," *8th International Symposium on signal, Image, Video and Communications Conference (ISIVC)*, Marrakech, Morocco, 19-21 November 2014.
- A. TAMIM, K. MINAOUI, A. ATILLAH, and D. ABOUTAJDINE, "Automatic Segmentation of Moroccan Coastal Upwelling Using Sea Surface Temperature Satellite Image," *6th Journées Doctorales en Technologies de L'Information et de la Communication (JD-TIC)*, Rabat, Morocco, 19-20 Juin 2014.
- A. TAMIM, K. MINAOUI, K. DAOUDI, A. ATILLAH, H. YAHIA and D. ABOUTAJDINE, M. F. SMIEJ, "A simple tool for automatic extraction of Moroccan coastal upwelling from Sea Surface Temperature images," *9th International Conference on Intelligent Systems : Theories and Applications (SITA)*, pp.1-4, Rabat, Morocco, 7-8 Mai 2014.
- A. TAMIM, K. MINAOUI, K. DAOUDI, H. YAHIA, A. ATILLAH, M.F. SMIEJ, D. ABOUTAJDINE, "A simple and efficient approach for coarse segmentation of Moroccan coastal upwelling," *21st European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 1-5, Marrakech, Morocco, 9-13 Septembre 2013.

ACQUISITIONS SATELLITAIRES ET ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE D'UPWELLING : APPLICATION À LA CÔTE ATLANTIQUE MAROCAINE

Ce chapitre décrit dans un premier temps la base de données utilisée dans ce travail pour appliquer les différentes méthodologies et l'évaluation de leur pertinence quant à l'analyse du phénomène d'upwelling. Ensuite, la problématique de détection et de suivi du phénomène d'upwelling sera explicitée en guise d'introduction à l'application des différentes méthodologies pour résoudre le problème d'identification des structures complexes caractérisant ce phénomène turbulent. Pour une description détaillée et exhaustive du phénomène d'upwelling tout au long de la côte atlantique marocaine, une série de publications est disponible dans la littérature (Atillah, 1993; Nykjear and Van Camp, 1994; Metzner and Hennings, 1995; Nieto et al., 2012).

2.1 Images du satellite NOAA/AVHRR

La télédétection se résume à l'ensemble des techniques qui permettent l'observation des systèmes terre, océans, atmosphère, à distance, sans contact matériel avec ceux-ci (Paul et al., 1982). Elle exploite les propriétés du rayonnement électromagnétique des différents objets de la surface terrestre.

2.1.1 Image satellitaire

Une image satellitaire est la traduction des mesures des énergies acquises dans des plages spectrales bien déterminées (visible, vapeur d'eau, infrarouge thermique, proche infrarouge, hyperfréquence, etc.), pour chaque surface observée. La résolution spatiale correspond à l'unité élémentaire d'acquisition de surface au sol effectuée par chaque capteur (et la mesure associée est celle d'un pixel élémentaire). Ainsi, chaque canal est représenté par une image, et chaque image est constituée d'une succession de lignes composées elle-même de pixels.

L'image, à ce stade, ne représente aucune valeur géophysique, interprétable ou utilisable pour décrire un phénomène marin ou terrestre, c'est une image avec des valeurs radiométriques exprimées en octets qui nécessitera toute une série de prétraitements pour passer de la valeur de luminance à la valeur géophysique (température, albédo, ...) (Atillah, 1993).

2.1.2 Mesures radiométrique

Notre univers est rempli de radiations électromagnétiques qui s'étalent sur une étendue de longueurs d'onde allant des rayons gamma de petites longueurs d'onde (de l'ordre de $10^{-10}\mu\text{m}$) jusqu'aux ondes hertziennes de grandes longueurs d'onde ($10^{10}\mu\text{m}$) (Fig. 2.1).

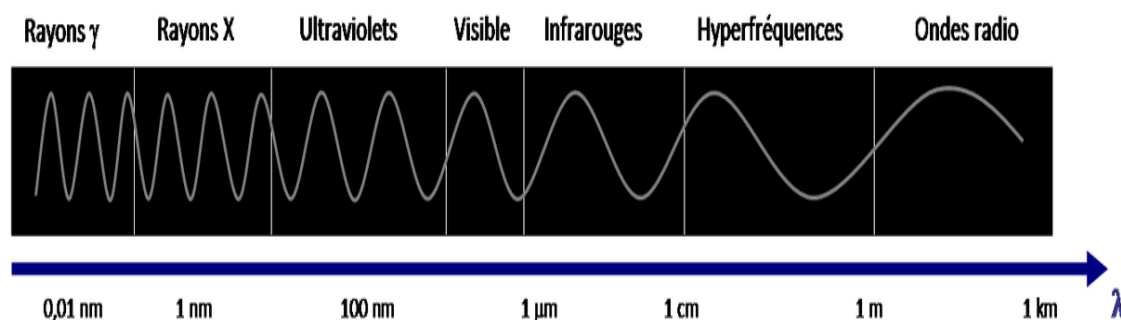


FIGURE 2.1 – La répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leurs longueurs d'onde (UVED, 2008).

La télédétection ne s'intéresse qu'à une petite gamme du spectre électromagnétique, allant du visible aux hyperfréquences. Les capteurs, de leur côté, n'interceptent les rayonnements électromagnétiques que dans des classes de longueurs d'onde (notion de canaux) pour lesquelles sont conçus et judicieusement choisis en fonction de la surface et du thème que l'on souhaite explorer. À partir de là, on conçoit les canaux dont le nombre est variable en fonction des radiomètres et des satellites. Les domaines radiométriques majoritairement utilisés pour la télédétection sont le visible et l'infrarouge (Atillah, 1993).

2.1.2.1 Rayonnement visible

La fenêtre du visible qui s'étend entre 0,4 μm et 0,7 μm représente la transcription de ce que pourrait voir l'oeil humain à partir d'un satellite. La mesure radiométrique du visible est alors fonction de l'éclairement solaire réfléchi par des objets des surfaces terrestres, maritimes ou nuageuses, permettant ainsi la distinction entre les différentes surfaces.

Dans une image satellitaire en niveau de gris, la mer, par exemple, constitue un système très peu réfléchissant, par conséquent, elle sera représentée en noir, tandis qu'un nuage, considérée comme une matière beaucoup plus réfléchissante sera représenté en blanc. La terre prend les couleurs intermédiaires (niveaux de gris) dont l'intensité est fonction de la réflectance des objets observés. Pour le rayonnement visible, seul les images du jour sont évidemment utilisables. En général, les images acquises par ce canal n'interceptent que le rayonnement qui provient des objets du globe éclairé par le soleil.

2.1.2.2 Rayonnement infrarouge

Les capteurs infrarouge thermique (ou capteurs thermiques) observent le rayonnement électromagnétique dans la bande de fréquence comprise entre 10 μm et 13 μm ; ils bénéficient d'une transparence par rapport à l'atmosphère et d'une faible intensité de radiance solaire. Dans cette fenêtre, le radiomètre mesure essentiellement l'aspect thermique et énergétique (température de surface) de la terre, en utilisant des photodétecteurs dont la surface est sensible au contact des photons infrarouges émis par la surface terrestre. Ces détecteurs sont refroidis à des températures très basses (près du zéro absolu), de façon à limiter leur propre émission d'infrarouge thermique. Chaque teinte de gris sur une image thermique correspond à une température : la terre, la mer, le sommet des nuages, ... (Atillah, 1993).

Toutefois, malgré la grande transparence de l'atmosphère dans ce domaine, la luminance enregistrée par le capteur infrarouge est une donnée perturbée par les effets de l'absorption (vapeur d'eau) et de la diffusion (aérosols) atmosphériques qui ne sont pas négligeables dans cette fenêtre. De ce fait, la mesure radiométrique obtenue demeure altérée et nécessite une correction des effets de l'atmosphère avant la dérivation de la température de surface. Par ailleurs, et comme l'énergie infrarouge émise par chaque objet ne dépend que de son état thermique (et pas du rayonnement solaire), les capteurs infrarouges acquièrent des données aussi bien le jour que la nuit.

2.1.3 Satellite NOAA et capteur AVHRR

Plusieurs satellites ont été mis en orbite afin d'assurer une observation météorologique et une couverture totale et permanente du globe terrestre. Deux catégories de satellites assurent la veille météorologique mondiale (Fig. 2.2) :

- Satellites géostationnaires qui se trouvent sur une orbite circulaire dans le plan de l'équateur et à des altitudes très élevées telle que la série des satellites METEOSAT qui délivrent une information continue à raison d'une image toutes les 30 minutes. La principale limitation de ces satellites est qu'ils ne couvrent pas les régions polaires et offrent une résolution spatiale moins fine ;
- Satellites à orbite polaire opérant à des altitudes plus basses et ayant une résolution spatiale souvent plus élevée. C'est le cas des satellites NOAA/AVHRR qui fournissent deux images par jour, une dans le sens descendant et l'autre dans le sens ascendant.

Dans notre étude, nous avons opté pour l'utilisation des données issues du capteur AVHRR (Advanced Very High Radiometric Resolution) à bord du satellite à défilement NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration). Le satellite est placé sur une orbite quasi-polaire à une latitude comprise entre 800 et 860 km. Il s'agit d'un système de surveillance opérationnel conçu et développé par les États-Unis et acquiert deux images par 24h, une pendant le jour en orbite ascendante (vers 13h30) et une pendant la nuit en orbite descendante (vers 2h30). Les données fournies par le capteur AVHRR sont destinées à la surveillance et à l'étude de la météorologie, de l'environnement, du climat, de l'hydrologie, de l'océanographie,... (Guillot, 1981).

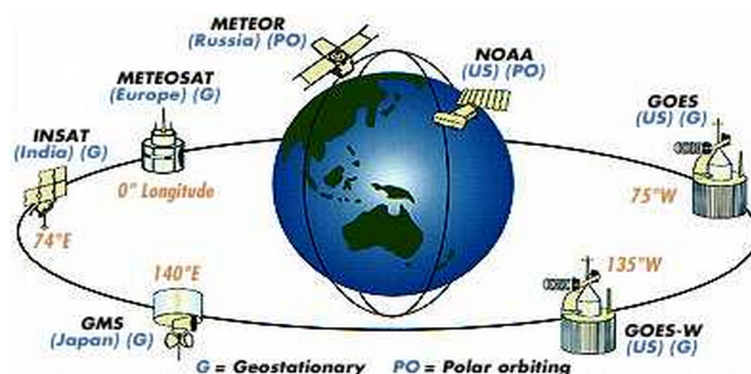


FIGURE 2.2 – Satellites géostationnaire (G) et satellites à orbite polaire (PO) (EOEdu, 2010)

Le radiomètre AVHRR à bord des satellites est un capteur multispectral qui mesure le rayonnement dans 5 bandes spectrales différentes (i.e. Canaux) (Fig. 2.3). Les deux premiers canaux (1 et 2) enregistrent des mesures respectivement dans le domaine du visible et du proche infrarouge et fournissent des informations sur les nuages, l'albédo, les côtes, la répartition de la végétation et l'environnement d'une manière générale. Le canal 3 reçoit le signal du domaine infrarouge moyen provenant à la fois du rayonnement solaire réfléchi et du rayonnement terrestre émis. Il sert essentiellement à la discrimination des nuages. Les 2 autres canaux (4 et 5) fonctionnent dans le domaine de l'infrarouge thermique (respectivement 11 μm et 12 μm) et fournissent des mesures de la température radiative à la surface des sols, des mers et des nuages, aussi bien le jour que la nuit. La résolution spatiale des données NOAA est de l'ordre de 1.1 km, avec une fauchée couvrant environ 2048 pixels (soit environ 2400 km) de largeur à chaque passage du satellite en orbite ascendante ou descendante.

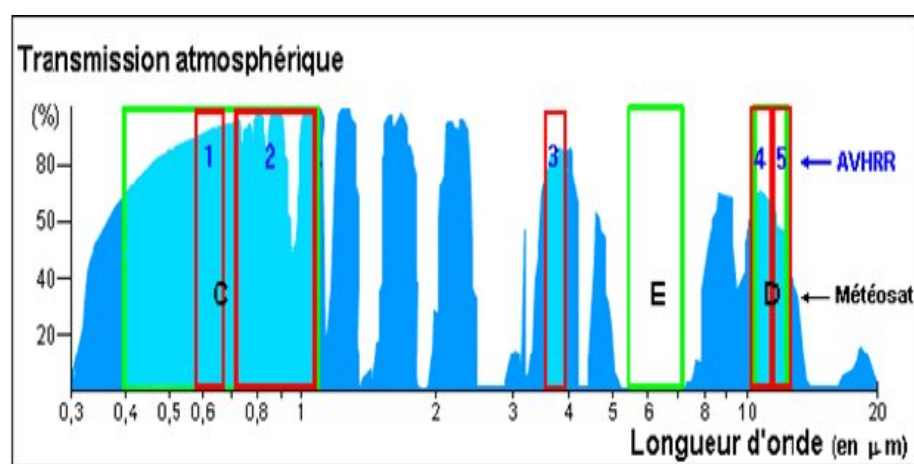


FIGURE 2.3 – Répartition des canaux du capteur AVHRR en fonction de la longueur d'onde (MeteoFrance, 2010).

2.1.4 Image de température de surface de la mer

Le travail effectué dans cette thèse est principalement destiné à l'étude de l'activité et de la variabilité spatiale et temporelle du phénomène d'upwelling sur la côte atlantique marocaine en utilisant des produits dérivés des mesures par satellites dans le domaine du spectre infrarouge thermique. La priorité est donnée aux images de Température de Surface de la Mer (TSM) mesurées par l'instrument AVHRR à bord du satellite NOAA. Le choix du TSM comme produit de base est dicté par le caractère opérationnel de ces mesures. En effet, le Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS) est doté d'une station de réception en temps réel des données NOAA et d'une chaîne de prétraitement allant de l'acquisition de données brutes (niveau 0) jusqu'à la génération des cartes de températures de surface en degrés Celsius (niveau 3). Grâce à leur résolution spatiale (1.1 km) et leur répétitivité (au moins une fois par jour), ces données sont parfaitement adaptées à l'identification, à l'analyse et au suivi spatio-temporel des phénomènes à moyenne échelle tel que celui de l'upwelling caractérisé notamment par des températures de surface bien basses par rapport à celles du large et facilement détectables sur l'image thermique.

La TSM utilisée dans cette étude représente une mesure de température, basée sur une combinaison entre les mesures du canal 4 (11 μm) et les mesures du canal 5 (12 μm) du capteur NOAA/ AVHRR. Elle exprime le rayonnement thermique émis par une pellicule superficielle extrêmement fine d'une épaisseur d'environ 50 microns (Wald, 1980). Il est donc difficile de comparer cette température de surface avec la température in-situ obtenue par des compagnes océanographiques à une certaine profondeur (1 à 10 m), et qui peuvent différer sensiblement de celles mesurées par le capteurs des satellites, particulièrement dans le cas des journées ensoleillées caractérisées par un réchauffement superficiel des eaux (Atillah, 1993). Néanmoins, l'agitation systématique des eaux de mer sur une certaine profondeur, quelles que soient les conditions météorologiques, fait que ces températures peuvent être représentatives d'une certaine couche de la mer (Atillah, 1993).

Le produit TSM est une synthèse spatiale composée de plusieurs passes (fauchées) du satellite sur la région du Maroc pendant la même journée ou la même nuit. Un masque nuageux et un masque terrestre sont dropés sur chaque image thermique pour masquer tous les pixels qui ne font pas partie de la surface marine visible à partir du capteur. Chaque produit TSM est calculé et traité en tenant compte de l'instrument d'acquisition. En effet, chaque capteur AVHRR présente des caractéristiques radiométriques différentes des autres ; ces caractéristiques sont prises en compte sous la forme des jeux de coefficients dans l'algorithme de calcul de TSM. Par ailleurs, la méthode de calcul des TSM diffère entre les acquisitions du jour et les acquisitions de nuit.

La principale limitation de la mesure de la TSM par satellite est la couverture nuageuse qui empêche toute mesure sur certains pixels de la mer. Afin de contourner cette limitation, le CRTS a mis en place une chaîne de prétraitement qui permet d'effectuer toutes les opérations d'étalonnage et de calibration, de corrections atmosphériques et de corrections géométriques pour produire des données de synthèses spatiales quotidiennes et de synthèse hebdomadaires sur une période de 8 jours en comptabilisant les valeurs de TSM maximales pour chaque pixel sur les 8 acquisitions quotidiennes couvrant la semaine.

2.1.4.1 Chaîne de prétraitement des données de la TSM

L'objectif majeur de cette étape est de mettre en place un système opérationnel d'exploitation des données satellitaires allant de l'acquisition en temps réel des données brutes AVHRR acquises par la station de réception HRPT (High Resolution Picture Transmission) installée au sein du CRTS, jusqu'à la production opérationnelle des cartes de température de surface de la mer. La chaîne de prétraitement de ces données, comme décrite dans le document (Glove, 2002), passe par les étapes principales suivantes :

- Acquisition des données brutes au sein du CRTS par la mise en place de deux stations de réception des images en temps réel en format HRPT. En plus des données de radiométrie, ces données brutes contiennent des informations supplémentaires telles l'angle zénithal solaire, la longitude/latitude de la surface terrestre visée qui sert à la correction géométrique, le coefficient d'étalonnage qui sert aux corrections radiométriques ;
- Etalonnage en réflectance pour le visible et en température de brillance pour les canaux thermiques afin d'avoir des données calibrées et corrigées d'un certain nombre d'erreurs ;
- Corrections des effets atmosphériques des mesures thermiques pour éliminer les effets perturbateurs de l'absorption et la diffusion atmosphériques et s'approcher de la tem-

pérature réelle de la surface de la mer. Cette opération repose sur la technique dite de "Split Window" qui consiste à calculer la différence de température entre le canal 4 et le canal 5 du capteur AVHRR pour s'affranchir des perturbations atmosphériques (Coll and Caselles, 1997) ;

- Correction des déformations géométriques résultant du changement des trajectoires des satellites et du système de balayage du radiomètre AVHRR caractérisé par un champ de vue très large d'une part, et de la forme sphérique de l'espace terrestre visé d'autre part. Il est impossible de travailler à une échelle multitemporelle en raison du fait que les images ne sont pas superposables la plupart du temps. Afin de corriger ces distorsions géométriques, les images sont rectifiées selon un référentiel géographique pour permettre la superposition des images à des dates différentes (Atillah, 1993) ;
- Projection des données sur une grille géographique de façon à pouvoir utiliser des coordonnées géographiques (latitudes/longitudes) au lieu des coordonnées images (colonne/ligne) ;
- Génération des masques de nuage et terre.

2.1.4.2 *Produit synthèse temporelle de TSM*

L'objectif principal du produit temporel est de synthétiser les données générées quotidiennement à partir de plusieurs passages quotidiens du satellite NOAA/AVHRR sur la région du Maroc, tout en conservant la variabilité aux échelles de temps de la dynamique des structures océaniques, et aussi en diminuant les nombres de pixels nuageux dans l'image de sortie.

Produit quotidien de la TSM

Le produit synthèse journalière de TSM utilisé dans cette étude est une image de température de surface de la mer renouvelée régulièrement (chaque jour) à partir des 2 passes du satellite NOAA/AVHRR sur la région du Maroc. L'algorithme utilisé est le Maximum Value Composite (MVC) (Holben, 1986), qui permet de conserver la valeur maximale de la température de chaque pixel durant les deux passes successives du satellite pour couvrir l'ensemble du territoire marocain. Cette méthode permet de réduire énormément le nombre de pixels altérés par les nuages qui ont échappé aux masques nuageux.

Produit hebdomadaire de la TSM

Compte tenu de la grande quantité des données TSM générées quotidiennement et de la difficulté que pose ces données quotidiennes pour l'interprétation et le suivi du phénomène d'upwelling, des synthèses temporelles sont produites sur une période donnée. Ces synthèses permettent de réduire le nombre d'images à analyser d'une part et permettent d'obtenir un produit final dépourvu de tout nuage sur l'ensemble de la période, d'autre part. Dans le cas de suivi de l'upwelling, la période retenue pour la synthèse temporelle est le pas de 8 jours pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ce choix s'avère très bien adaptée pour le suivi temporel du phénomène d'upwelling le long des côtes marocaine et permet aussi d'éliminer les phénomènes à variabilité à très court terme et les possibles artefacts dans les images quotidiennes. Ainsi, chaque synthèse temporelle couvre donc une période de 8 jours calendaires.

Après le choix de la période temporelle, le projet (Germa, 2004) a permis de tester l'algorithme d'affectation de la valeur au pixel de sortie de cette synthèse. Un exercice pratique a

Paramètres	Valeur	Remarque
Pas en latitude	0.01°	Résolution : 1.1 km
Pas en longitude	0.01°	Résolution : 1.1 km
Nombre de lignes	1600	Latitude : 20°3'N - 36°3' N
Nombre de colonnes	1800	Longitude : 23°0'W - 5°0'W

TABLE 2.1 – Caractéristiques des images TSM couvrant toute la côte atlantique marocaine

été mené en conservant soit la valeur minimale, soit la valeur maximale, soit la valeur centrale ou encore la moyenne des pixels d'entrée constituant la synthèse. Suite à l'analyse des résultats des différents processus, le choix de la valeur maximale pour les 8 images constituant la période semble le plus adéquat pour la conservation de la dynamique de l'upwelling ainsi que son étendue d'origine et ses structures thermiques. Mais ce choix est dicté surtout par la réduction sensible du nombre des pixels douteux (influencés par la présence de nuages). En revanche, la moyenne et le minimum ont tendance à augmenter le nombre de pixels affectés par les nuages qui ont été mal masqués par l'algorithme de détection des nuages (Stowe et al., 1999). Néanmoins, cette synthèse par maximum produit un certain réchauffement apparent des eaux de surface, mais ce réchauffement n'altère pas la détection de l'upwelling et de ses structures.

2.1.5 Extraction de la zone d'intérêt et mise en place de la base de données d'étude

Les images journalières et hebdomadaires utilisées dans notre étude d'analyse du phénomène d'upwelling sont géo-référencées en projection plate carrée et dimensionnées de façon à couvrir l'ensemble du littoral atlantique marocain. La Table 2.1 illustre les différentes caractéristiques des images TSM. Le pas de la résolution spatiale de 1 km apparaît suffisant pour identifier les structures de moyenne échelle telles que les zones d'upwelling et les filaments. La Fig. 2.4 montre schématiquement le domaine couvert par ces images. Cette base de donnée regroupe des images de TSM (journalières et hebdomadaires) couvrant les années 2005, 2006, 2007, 2008 et 2009.

Néanmoins, malgré les différents traitements utilisés pour réduire le nombre de pixels dans les données TSM (i.e. synthèse temporelle, algorithme de détection des nuages, ...), ces images contiennent encore des zones où la couverture nuageuse masque les structures d'upwelling dans notre région d'étude. Dans le but de mieux réduire les effets des nuages sur notre région d'intérêt, on a construit un masque qui va nous servir d'outil de génération de notre base de données d'étude. En effet, si l'image contient au moins 50% des pixels non nuageux (pixels de TSM) dans la zone entre la côte et 200 km au large, l'image sera considérée valide et alimentera notre base de données (Nieto et al., 2012; Metzner and Hennings, 1995). La Fig. 2.5 montre le masque utilisé pour générer notre base d'images.

Un autre problème, qui sous-tend nos travaux et qui va peser sur le choix des images considérées dans la suite de nos expériences, est relatif à la taille de celles-ci. En effet, les images citées dans la Table 2.1 sont de taille 1600×1800 pixels, et par conséquent l'application des méthodes de traitement et d'analyse de données consomment un temps considérable sur ces images. Afin de réduire ce temps de calcul, et dans le but de permettre le traitement en temps réel, on a réduit la taille originale des images à 770×990 pixels couvrant la partie sud de la

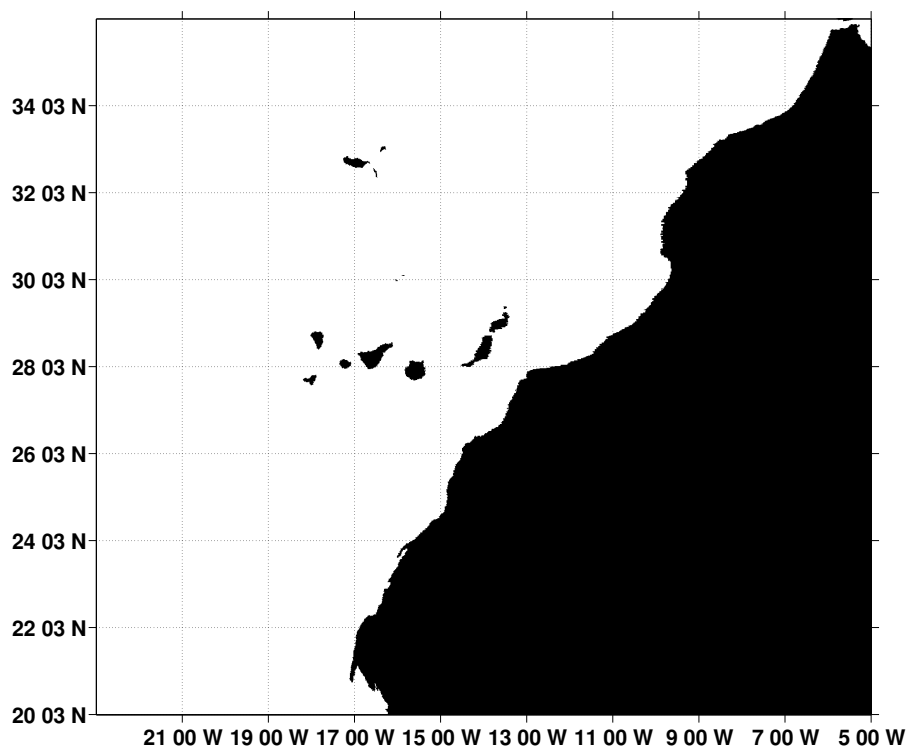


FIGURE 2.4 – Domaine couvert par les images TSM

Paramètres	Valeur	Remarque
Pas en latitude	0.01°	Résolution : 1.1 km
Pas en longitude	0.01°	Résolution : 1.1 km
Nombre de lignes	770	Latitude : 19°80'N - 27°80'N
Nombre de colonnes	990	Longitude : 13°30'W - 23°30'W

TABLE 2.2 – Caractéristiques des images TSM couvrant la partie sud de la côte atlantique marocaine

côte atlantique marocaine (Table2.2). Comme on peut le constater, seule la taille des images a changé, les résolutions spatiales et temporelles gardent les mêmes valeurs.

2.2 Upwelling marocain : phénomène marin des eaux côtières aux structures complexes

2.2.1 Pourquoi l'analyse et le suivi de l'upwelling ?

La côte atlantique marocaine, s'étendant sur plus de 3000 km, est parmi les côtes les plus riches en ressources halieutiques, contribuant ainsi au développement de l'économie du Maroc. Cette richesse est favorisée par la présence permanente ou saisonnière des eaux froides qui remontent à la surface de la mer le long des côtes, ce phénomène est appelé "upwelling". En effet, ces eaux relativement froides parvenant à la surface depuis une certaine profondeur (200 à 300

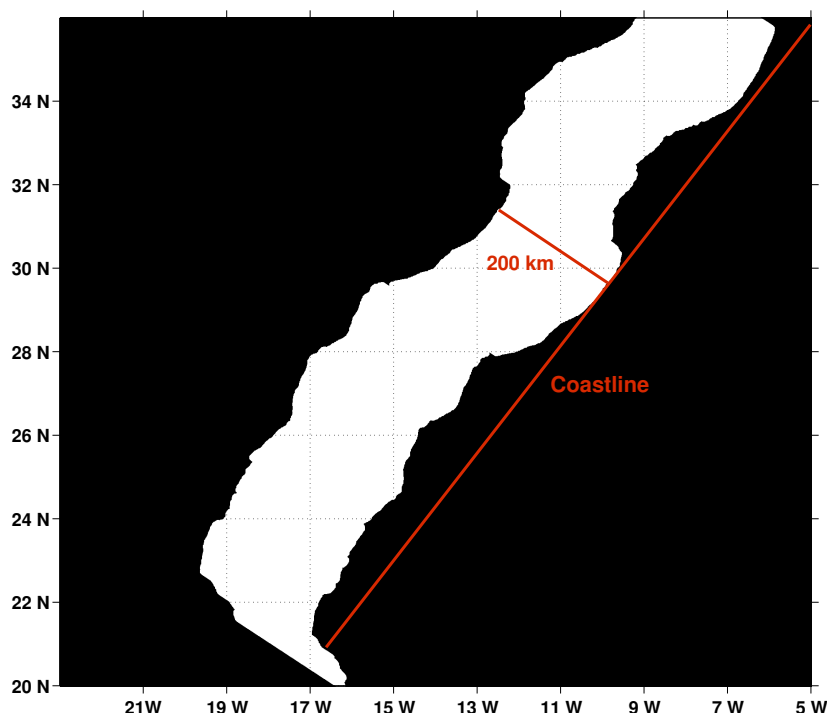


FIGURE 2.5 – Masque utilisé pour sélectionner les images de la TSM

m) (Atillah, 1993; Zhang et al., 2012), apportent dans la couche euphotique des éléments minéraux originaires des couches subsuperficielles, i.e. nitrate, azote et phosphore, qui constituent le résultat de la décomposition des organismes autotrophes considérés généralement comme le premier maillon d'une chaîne alimentaire. Une fois que ces éléments nutritifs sont en surface, ils sont rapidement utilisés par des petites algues chlorophylliennes microscopiques (le phytoplancton) combinés avec le dioxyde de carbone (CO_2) et l'énergie solaire, afin de produire des composés organiques à travers le processus de la photosynthèse (Diersling, 2012); cette prolifération ou efflorescence algale (algal bloom) se traduit par une augmentation relativement rapide de la concentration des phytoplanctons dans les eaux de surface qui nourrissent les petits crustacés appartenant à la famille des zooplanctons qui nourrissent à leur tour les poissons mangés eux même par les grands prédateurs tels que les thons, les oiseaux et les mammifères marins (Lalli and Parsons, 1997; Jennings et al., 2001; Mann and Lazier, 1996; BRODEUR and WARE, 1992). Néanmoins, ce processus (ou réseau) alimentaire est beaucoup plus complexe qu'une simple chaîne linéaire, car, il est hautement fluctuant et aisément impacté par les pressions environnementales et l'exploitation intensive.

Compte tenu de la richesse halieutique et des ressources biologiques considérables que possède le littoral atlantique marocain, le secteur de la pêche joue un rôle prioritaire dans le développement socio-économique de ce pays (Germa, 2004). Néanmoins, l'exploitation excessive des ressources halieutiques entraîne une diminution préoccupante du stock de poissons dans la région, et perturbe, par conséquent, la préservation de l'équilibre écologique des populations de poissons. Afin de protéger au mieux la biodiversité, l'environnement et les ressources halieutiques, la dynamique des populations de poissons doit être liée aux connaissances des

phénomènes physiques et biologiques de la région (Chassot et al., 2011). De ce fait, l'étude et le suivi de l'upwelling côtier revêt un intérêt particulier. En effet, la région du Maroc est influencée en grande partie par la variabilité spatio-temporelle de l'upwelling côtier (Atillah et al., 2005). Concrètement pour les pêcheurs, la présence d'un upwelling fort se traduit par une augmentation importante du stock de poissons.

2.2.2 Définition de l'upwelling côtier

L'upwelling côtier est un phénomène hydrométéorologique marin qui se manifeste par la présence sur la bordure côtière d'une eau plus froide que celle du large. Ainsi, au lieu d'avoir une distribution des isothermes horizontaux et une température qui baisse du Sud vers le Nord en fonction des latitudes, la présence de l'upwelling impose une distribution plutôt méridionale avec une baisse du large vers la côte. Cette remontée des eaux depuis les couches profondes vers la surface sous forme d'un courant ascendant ou convergeant, est caractérisée à la fois par une baisse considérable des températures à la surface de la mer et par un accroissement des sels nutritifs. Dès lors, la thermocline qui sépare les eaux chaudes de la couche de mélanges superficielle des eaux froides profondes, remonte peu à peu en surface jusqu'à sa disparition totale et la stratification verticale des eaux océaniques (baisse des températures de la surface vers le fond) jusqu'à sa suppression. Ce processus produit une structure thermique verticale homogène (Fig. 2.6).

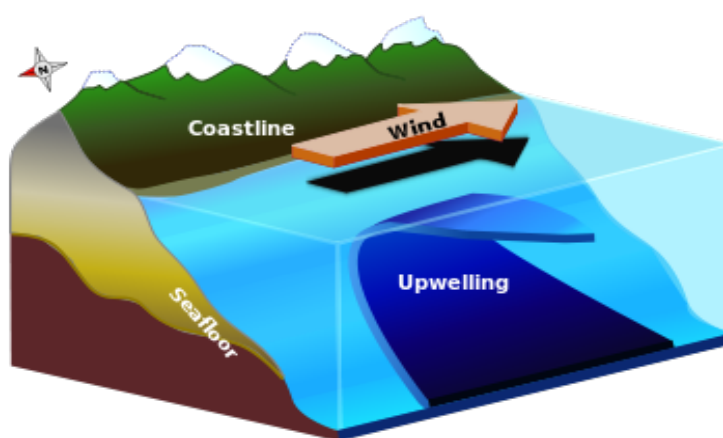


FIGURE 2.6 – Circulation verticale lors d'un upwelling côtier (Wikimedia, 2011).

La plus évidente des manifestations de ce phénomène en surface est la formation d'une zone thermique frontale séparant les eaux chaudes et stratifiées du large des eaux côtières froides et verticalement homogènes. Ainsi, le phénomène d'upwelling permet aussi de générer une succession de fronts thermiques plus ou moins forts à l'intérieur même des aires d'upwelling en fonction de l'intensité et de la durée de l'activité de l'upwelling caractérisant ainsi l'instabilité, hétérogénéité et la complexité des structures de ce phénomène. Par ailleurs, l'intensité et l'extension spatiale de l'upwelling, notamment au niveau des côtes marocaines, connaissent une grande variabilité à la fois saisonnière et inter-annuelle. Cette variabilité est induite par les fluctuations des conditions aérologiques le long des côtes qui sont à l'origine du processus de formation de l'upwelling.

Généralement, il existe quatre principales zones d'upwelling au monde associées à quatre principaux courants côtiers : upwelling du courant des Canaries dans l'hémisphère Nord de l'océan atlantique, upwelling du courant de Benguela dans la partie sud du même océan, l'upwelling du courant de Californie dans l'océan pacifique Nord et l'upwelling du courant de Humboldt vers le Sud du Pacifique (Pérou et Chili). Tous ces systèmes d'upwelling sont caractérisés par une grande quantité de poissons (Jennings et al., 2001).

2.2.3 Processus et facteurs à l'origine du phénomène d'upwelling le long des côtes atlantiques du Maroc

Le phénomène d'upwelling le long des côtes marocaines est le résultat d'une action conjuguée et complexe de plusieurs facteurs extra-terrestres, météorologiques et géographiques : l'insolation, les vents, la rotation de la terre, la configuration des côtes par rapport aux vents dominants, la profondeur et la largeur du plateau continental (Atillah, 1993) :

- Le rayonnement solaire exerce une action thermique sur les eaux océaniques de surface en les chauffant et les rendant légères d'une part et en créant une forte stratification verticale des eaux avec un renforcement de la thermocline qui sépare la couche d'eau chaude en surface et la couche d'eau froide en profondeur. Ainsi, les eaux chaudes et légères de surface, en plus d'une évaporation renforcée qui les caractérise sont facilement déplaçables vers le large dès que les premiers coups de vent se manifestent, pour être remplacées par des eaux froides de la mi-profondeur. La thermocline bien installée contribue au glissement de la couche superficielle légère sur la couche sous-jacente froide et dense.
- Néanmoins, le moteur principal à l'origine de la formation et l'entretien de l'upwelling est la prédominance des vents dans une direction sensiblement parallèle ou perpendiculaire à la côte le long du littoral (Wooster et al., 1976). En effet, la régularité et la permanence de ces vents met en mouvement les couches superficielles de l'océan conjuguée à l'effet de la rotation de la terre (force de Coriolis), et déplace par frottement les eaux chaudes et légères de surface de la couche homogène qui glissent sur la couche profonde froide et dense et perturbe par conséquent la stratification thermique habituelle du milieu marin. Ce déplacement est accentué par la thermocline qui contribue au glissement de la couche superficielle sur la couche sous-jacente. Ces déplacements se font en direction du large et provoquent une baisse du niveau marin au niveau des côtes, si les vents sont de direction Nord à Est (Hémisphère Nord). Le déficit en eau en surface tend alors à être compensé par un afflux d'eaux denses et froides provenant de la couche profonde (upwelling). En revanche, si la direction du vent est plutôt de Sud à Ouest (Hémisphère Nord), les eaux chaudes sont accumulées vers la côte (Downwelling) (Fig. 2.7). S'il est difficile d'établir une relation immédiate entre la force du vent et l'intensité de l'upwelling, en raison de l'intervention d'autres facteurs, on estime, qu'il faudra quelques heures voire quelques jours de décalage entre l'action du vent et la remontée d'eau froide (Atillah, 1993). Par ailleurs, l'upwelling peut se prolonger quelques jours ou quelques semaines de plus après la cessation des vents (effet d'inertie).
- L'action du vent sur le déplacement de eaux en surface est grandement influencée par l'effet de la rotation de la terre. En effet, le transport résultant au sein de la masse d'eau est orienté non pas dans la direction du vent mais, il est dévié vers sa droite dans l'hémisphère Nord et vers sa gauche dans l'hémisphère Sud. Au cours de ce processus, le

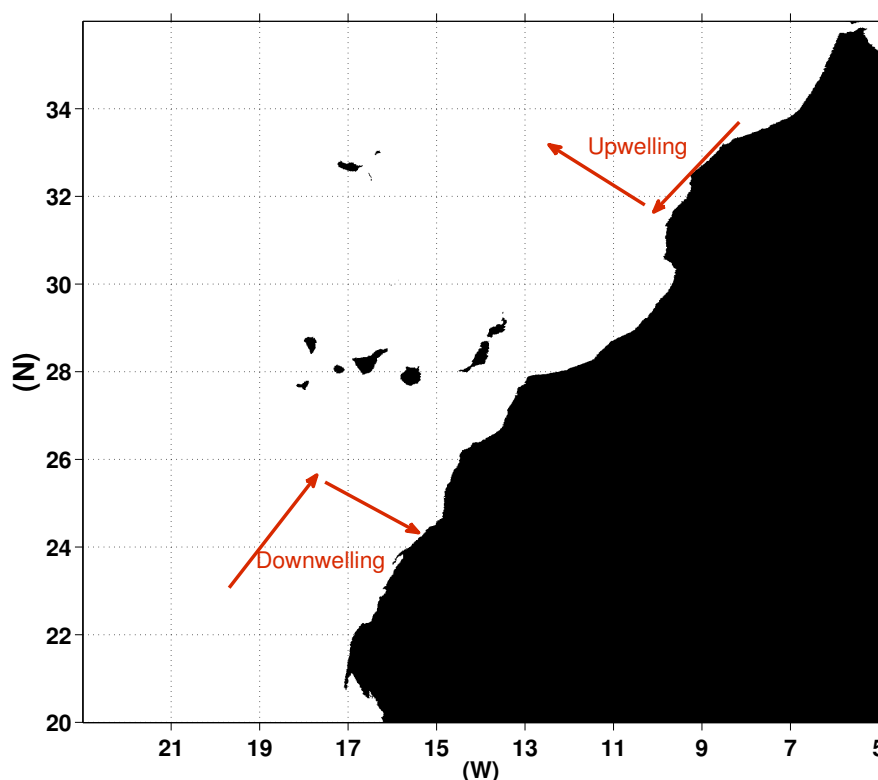


FIGURE 2.7 – Schéma de formation de l'upwelling et de downwelling par les vent le long du littoral atlantique marocain.

courant tourne en profondeur en s'écartant de la direction du vent. La couche superficielle soumise à l'action du vent est appelée couche d'Ekman du nom de Y. W. Ekman qui le premier a développé les bases de la théorie décrivant l'effet du vent sur les courants (Ekman, 1905). L'épaisseur moyenne de la couche d'Ekman peut atteindre quelques dizaines de mètres et elle est exprimée en million de mètres cubes par seconde (Fig. 2.8). Ainsi, au niveau des côtes atlantiques marocaines, et selon cette même théorie, un vent alizéen de Nord à Est lié à l'anticyclone des Açores, et qui souffle parallèlement ou perpendiculairement au littoral selon l'orientation du trait de côte, va entraîner un déplacement des eaux chaudes côtières vers le large (à droite du vent) (Fig. 2.7). Un flux vertical froid le long du talus continental va permettre de compenser le déséquilibre à la côte et créer l'upwelling. Inversement, si le vent est de direction Sud à Ouest, les eaux seront poussées vers les côtes (à droite du vent) pour créer plutôt un "downwelling".

D'autres facteurs, plus ou moins importants, peuvent également contribuer à l'accélération de la formation de l'upwelling, à son intensification voire à son entretien et sa maintenance dans le temps. A ce titre, la topographie sous marine et la forme et la largeur du plateau continental sont des éléments qu'il faut prendre en considération dans toute tentative d'explication de la variabilité spatiale et temporelle du phénomène d'upwelling, puisque les remontées d'eau froide sont d'abord un phénomène océanique de la plate forme continentale épousant souvent la forme et la largeur de ce plateau. Par ailleurs, le dessin de la côte a un effet non négligeable sur le courant de dérive que génèrent les vents de type Nord à Est, car les variations géographiques de

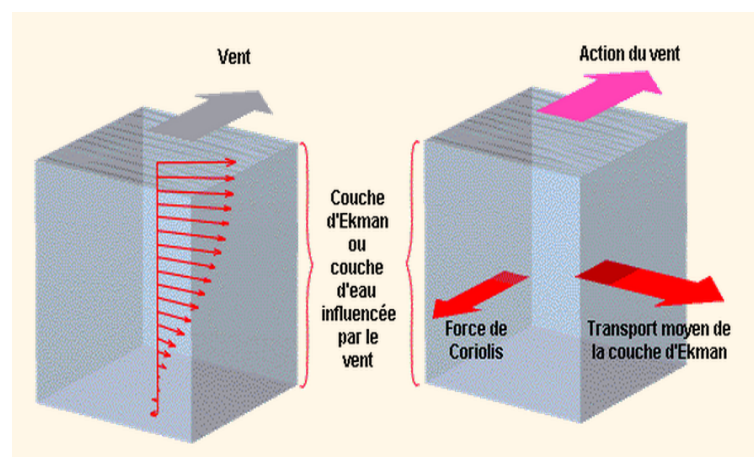


FIGURE 2.8 – Action du vent sur l’océan : le transport de la couche d’Ekman est perpendiculaire au vent, à droite dans l’hémisphère nord, à gauche dans l’hémisphère sud (Eduscol, 2006).

l’orientation de la côte par rapport à la direction du vent dominant ont comme effet de produire, par conséquent, un upwelling très variable en intensité et en extension géographique. Ainsi, on peut conclure que l’upwelling est un phénomène océanique complexe. Si les processus à son origine sont assez bien connus, plusieurs détails demeurent néanmoins inexplicés, notamment les facteurs qui les gouvernent. Néanmoins, on peut dire qu’il est le résultat d’une action simultanée de plusieurs facteurs météorologiques, cosmiques et géographiques (Atillah, 1993).

2.2.4 La distribution géographique de l’upwelling le long des côtes atlantiques du Maroc

À partir des différents travaux réalisés sur le phénomène d’upwelling le long de la côte atlantique marocaine (Nykjeer et al., 1992; Nykjeer and Van Camp, 1994; Atillah et al., 2005; Atillah, 1993), on constate que la formation des aires d’upwellings en plusieurs endroits de la côte se produit à des périodes variables de l’année en fonction des latitudes. Il affecte, cependant, d’une manière quasi-permanente certains secteurs de la côte. Ainsi, d’après les études précédentes, le phénomène est puissant et persistant tout au long de l’année dans la partie sud du Maroc (la région entre 21°0’N et 26°0’N) avec une intensité maximale entre mai et juin et entre septembre et décembre.

Pour certaines zones, au Nord de la latitude 26°10’N, le phénomène d’upwelling débute dès que les conditions de ventilation lui sont propices avec le renforcement des vents de Nord-Est de fin de printemps sur la bordure côtière qui amorcent la remontée en surface des eaux froides (Fig. 2.9(b)). Cette remontée se renforce en été pour atteindre son intensité et son extension maximale en fin de saison (août-septembre) et envahir presque l’ensemble du secteur côtier (Fig. 2.9(c)). En automne, le phénomène d’upwelling s’affaiblit et se désintègre après le relâchement des vents initiateurs du phénomène (Fig. 2.9(d)), soit par le retrait progressif des eaux de pente, soit par l’arrivée des eaux du large plus chaudes pour s’estomper en hiver. Cependant, le mouvement d’upwelling persiste à plusieurs endroits, avant de disparaître complètement pendant l’hiver suite au refroidissement général de l’ensemble des eaux du courant des Canaries, permettant ainsi aux eaux de retrouver leur équilibre thermohaline (Fig. 2.9(a)).

Au sud, le phénomène d'upwelling est permanent durant toute l'année avec une intensité qui varie en fonction des saisons en relation avec la variation saisonnière des conditions de ventilation. En effet, l'upwelling côtier présente une variation saisonnière très marquée d'une année à l'autre à cause de la variation brusque de l'intensité et de la direction des vents Nord-Est.

2.2.5 La répartition et la nature des structures thermiques de l'upwelling le long des côtes atlantiques du Maroc

Le phénomène d'upwelling est un processus hydrodynamique complexe qui génère une multitude de structures à mésoéchelles et submésoéchelles que l'imagerie satellitaire peut facilement déceler (localisation des eaux froides, répartition des TSM, identification des méandres et filaments, repérage des fronts thermiques...).

2.2.5.1 Répartition des eaux froides et des eaux chaudes

À partir des données des satellites opérant dans le domaine radiométrique infrarouge, il est très facile de suivre la répartition des masses d'eau composant le phénomène d'upwelling et la zone du large. Grâce à une résolution radiométrique très fine de l'ordre de 0.13°C , l'image thermique permet d'accéder aux détails des températures de surface de ces masses d'eau. Sur une thermographie, acquise quotidiennement, voire deux fois par jour, par chaque satellite à défilement, la répartition spatiale des températures et donc des isothermes dans les eaux d'upwelling présente une allure souvent méridienne (Nord-Sud) épousant ainsi la forme et le dessin aussi bien de la côte que du plateau continental (Fig. 2.10). Néanmoins, cette configuration simpliste est souvent altérée par des dispositions parfois aléatoires induites par une série de facteurs cités ci dessus, et il n'est pas rare d'avoir une distribution plutôt franchement horizontale, notamment dans les eaux de dérives et de filaments qui ont tendance à transpercer les eaux du large d'Est en Ouest.

Par ailleurs, il est très facile de localiser les eaux froides d'upwelling côtier et les eaux chaudes du large sur une image thermique, grâce à leur différence thermique. De même, à l'intérieur d'un upwelling, la thermographie permet de localiser les différentes masses d'eaux composant cet espace côtier et d'identifier par conséquent les zones côtières où l'upwelling est plus actif (sources d'upwelling) grâce à leur température plus basse (Fig. 2.10).

2.2.5.2 Fronts thermiques associés à l'upwelling

Un front thermique est défini comme la zone de transition (ou zone frontale) entre les eaux chaudes et les eaux froides. D'une manière générale, on parle de front thermique lorsque la température varie de 1°C ou plus sur une étendue spatiale de 10 km (Cassanet, 1981), et chaque front est décrit par trois principaux éléments (Nieto et al., 2012) : son identité, son état (ex. longueur, position, direction et intensité), et son comportement (ex. vitesse de déplacement et de déformation).

Les fronts thermiques sont des éléments essentiels dans l'étude et l'analyse des courants océaniques, dans la compréhension de la dynamique des océans et aussi dans l'étude et la gestion de l'habitat du poisson et les ressources pélagiques côtières (Chassot et al., 2011). En effet, Bakun (Bakun, 2006) a souligné que " L'importance des fronts dans l'écosystème pélagique ré-

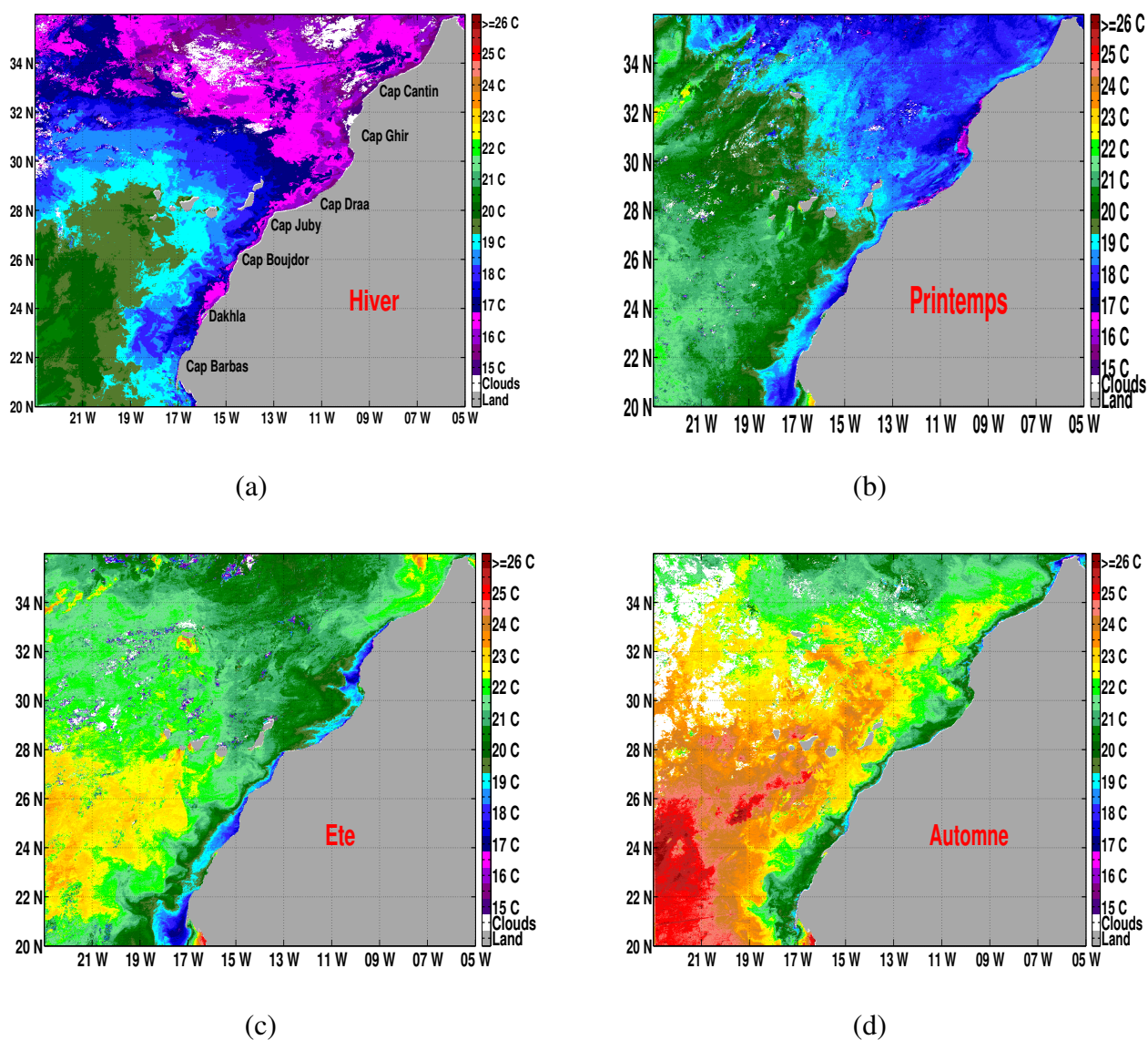


FIGURE 2.9 – L'évolution saisonnière de l'upwelling côtier marocaine dans l'année 2007.

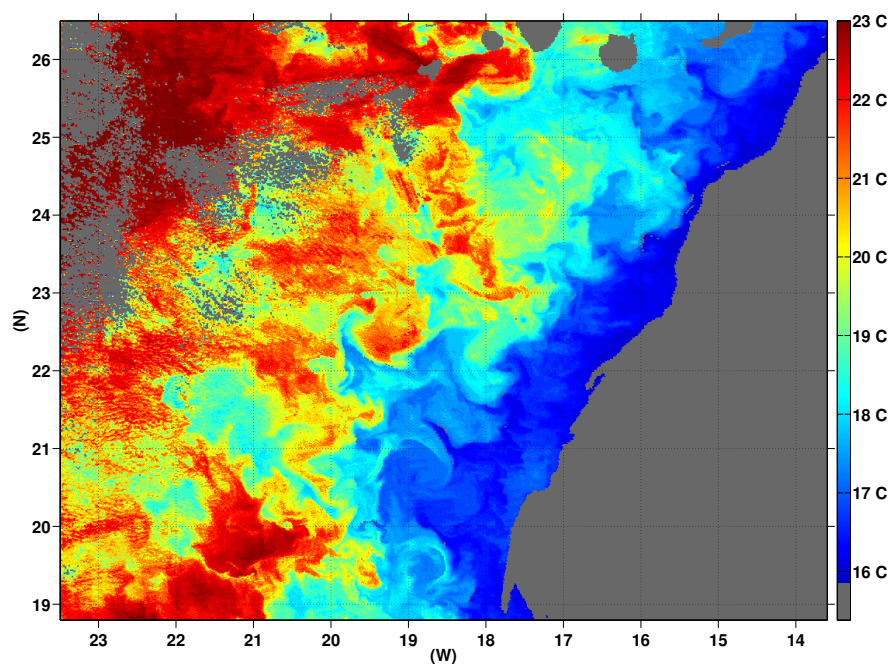


FIGURE 2.10 – Image TSM obtenue le 2007-01-02, représentant la répartition des températures de surface sur la partie sud de la côte atlantique Marocaine.

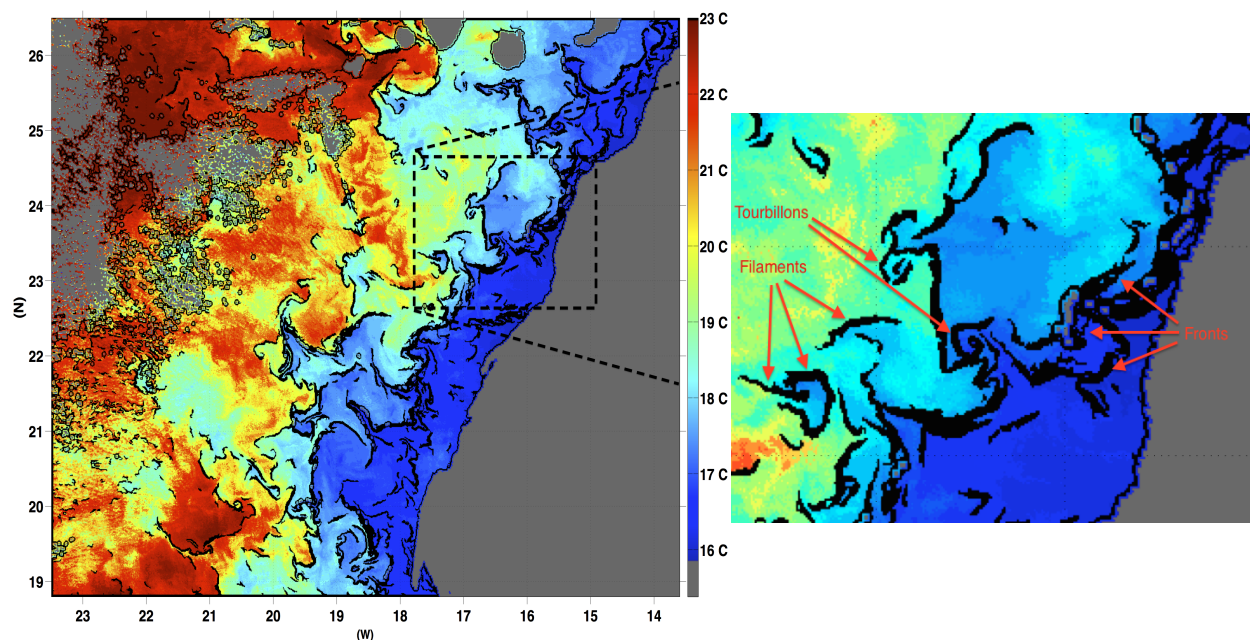


FIGURE 2.11 – Détection des structures thermiques dans l'image de TSM de la Fig. 2.10. Illustration des différentes structures océaniques à submésoséchelles présentes le long de la côte atlantique marocaine.

side dans le fait que n'importe quel front qui persiste sur une période de temps considérable doit

être associé à une zone de convergence et donc à la formation d'une eau froide intermédiaire concentrant les particules et ainsi forme des zones privilégiées de forte activité biologique." Ainsi, la mise en évidence de l'activité frontale dans l'océan peut aider à quantifier l'importance des effets des structures à submésoséchelle sur la production primaire et par la suite sur la production halieutique. En effet, ces fronts permettent de remettre en jeu les minéraux indispensables à la production biologique en rendant la couche euphotique superficielle de l'océan particulièrement riche en organismes vivants et forment d'excellentes zones de pêche.

Dans les systèmes d'upwelling, notamment l'upwelling côtier du Maroc, la masse d'eau froide, caractérisant l'upwelling, s'installe généralement près des côtes et occupe les aires du plateau continental, alors que la masse d'eau chaude se trouve bloquée vers le large. Ces deux masses aux températures différentes sont séparées par un front thermique souvent parallèle à la côte et à la forme du plateau continental avec un gradient thermique plus ou moins important en fonction de l'intensité de l'upwelling. Par ailleurs, vue l'instabilité qui caractérise les eaux d'upwelling, notamment lors de son activité, une multitude de fronts secondaires se génèrent à l'intérieur des eaux froides et participent ainsi à l'hétérogénéité de ces eaux. Ces structures thermiques de surface, qualifiées généralement de "submésoséchelles" s'étendant sur une dizaine de km se traduisent par des filaments cycloniques ou anticycloniques, dérives de surface, méandres, tourbillons, ... (Fig. 2.11). Afin de mettre en évidence ces différentes structures sur notre région d'intérêt, on a appliqué à l'image de la Fig. 2.10 la méthode de détection des contours Canny (Canny, 1986) (objet du chapitre 3) avec un seuillage adapté manuellement pour mieux détecter les structures thermiques de surface (Fig. 2.11).

Ces différentes structures thermiques superficielles à différentes échelles spatiales sont facilement identifiables sur les images de température de surface de la mer. À partir d'une simple image thermique avec des couleurs affectées aux classes de température, les fronts thermiques, les méandres, les dérives ou les filaments peuvent être détectés grâce au resserrement et le rapprochement dans l'espace des isothermes limitant les classes de températures (Fig. 2.11). Les premières méthodes apparues pour le traitement et la détection des fronts thermiques ont été basées sur des techniques simples. La méthode d'étalement de la dynamique de l'image permet d'améliorer les contrastes thermiques de la surface et les rendre bien visibles. Son principe repose sur l'augmentation des contrastes, c'est à dire l'étalement des écarts thermiques de faible amplitude sur plusieurs niveaux de gris (Atillah, 1993). Une autre méthode de traitement est également intéressante, consiste à utiliser un seuillage manuel sur les valeurs de l'image afin de fixer la position exacte du front thermique entre les eaux chaudes et les eaux froides. Néanmoins, ces méthodes simples et usuelles souffrent du manque d'une certaine objectivité, dans la mesure où ils reposent toutes sur l'appréciation de l'opérateur et de l'interprète. Par ailleurs, ces techniques manuelles et subjectives diffèrent d'une image à l'autre et ne peuvent s'exécuter d'une manière opérationnelle et automatique sur un nombre élevé d'images puisqu'elles nécessitent l'intervention systématique de l'opérateur pour réaliser ces traitements. C'est dans ce contexte que les méthodes de segmentation développées dans le cadre de ce travail, viennent apporter une valeur ajoutée et permettent de traiter d'une manière automatique et objective toutes les séries d'images d'une même manière pour identifier et positionner les fronts thermiques présents sur chaque image.

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les caractéristiques générales des images satellitaires de température de surface de la mer. Ensuite, nous avons défini les principales propriétés spectrales, spatiales et temporelles du capteur AVHRR du satellite NOAA ayant produit les images utilisées dans notre étude. Nous avons évoqué également les principaux outils de prétraitement développés au sein du CRTS pour la génération de la base de données d'images, notamment les synthèses quotidiennes et hebdomadaires de la température de surface de la mer.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, on a présenté en détail le phénomène d'upwelling ainsi que ses structures thermiques associées. On a également rappelé les principaux processus à l'origine de la formation de l'upwelling côtier marocain. La répartition des structures thermiques dans les images de la TSM est un bon indicateur de la présence et de l'intensité des fronts thermiques qui jouent un rôle prépondérant dans la production primaire.

L'application principale de notre étude est ainsi présentée : notre objectif est d'analyser, d'identifier et d'extraire les zones d'upwelling et les zones frontales dans les images infrarouges de température de surface de la mer. Il s'agit de proposer des algorithmes objectifs de détection de ces zones à partir des scènes acquises par imageries satellitaires. Par la suite nous proposons d'opter pour une approche de traitement d'image ou de vision par ordinateur pour s'attaquer à ce problème.

SEGMENTATION ET CLASSIFICATION DES IMAGES INFRAROUGES POUR LA DÉTECTION DES STRUCTURES THERMIQUES

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux méthodes standards de traitement d'images et de vision par ordinateur communément utilisées dans la segmentation des images de températures de surface de la mer. L'objectif de cet état de l'art est de pouvoir analyser quelques unes des approches couramment adoptées, notamment dans le cadre de l'analyse de données océanographiques, afin de mettre en avant leurs avantages et leurs limitations, et de sélectionner celles dont nous allons éventuellement pouvoir étendre les propriétés dans le système de segmentation que nous souhaitons concevoir.

3.1 Techniques de segmentation : Etat de l'art

3.1.1 Segmentation d'images

La segmentation est une opération de traitement d'images qui a pour objectif de regrouper des pixels ayant des critères prédéfinis, et ainsi organiser ces pixels en sous ensembles ou régions homogènes. En effet, la segmentation tente à associer à chaque pixel de l'image un label (i.e. étiquette) en s'appuyant sur l'information portée sur les niveaux de gris, la couleur ou la distribution spatiale. Etant donné une image, il existe toujours plusieurs segmentations possibles. Une bonne méthode de segmentation sera donc celle qui permettra d'arriver à une bonne interprétation. Elle devra donc simplifier l'image sans pour autant en avoir trop réduit le contenu.

Dans la suite de ce chapitre, une image I est définie par des valeurs discrètes représentant les coordonnées spatiales des pixels (i.e. ligne, colonne) et une fonction f , qui pourra être l'intensité pour les images à niveaux de gris ou la couleur dans l'un des espaces colorimétriques pour les images couleurs. On notera R une segmentation à évaluer, c'est donc une partition de I en sous-ensembles notés R_i , $i = 1, \dots, N$ et vérifiant les trois exigences suivantes (Jain, 1989) :

- *Exhaustivité* : tous les pixels de l'image doivent pouvoir être associés à une classe (Eq. 3.1).
- *Séparabilité* : les classes doivent être suffisamment différenciables pour qu'un pixel ne puisse être associé qu'à une seule classe (Eq. 3.1 et Eq. 3.3).
- *Pertinence* : l'ensemble des classes doit refléter l'information que l'utilisateur veut retirer de l'image.

$$\bigcup_{i=1}^N R_i = I \quad (3.1)$$

$$\forall i \neq j, R_i \cap R_j = \emptyset \quad (3.2)$$

$$\forall i, R_i \neq \emptyset \quad (3.3)$$

Chaque ensemble R_i de la partition peut être décrit soit par son intérieur, soit par sa frontière ; on parle alors respectivement de segmentation par région ou par contour.

De nombreuses techniques existent dans la littérature, certaines plus performantes que d'autres. Cette multitude de techniques rend leurs présentations difficiles, le plus souvent, le choix d'une stratégie de segmentation dépend de plusieurs facteurs liés à l'image ; tels que la nature de l'image, les conditions de son acquisition, les entités à extraire et également les contraintes d'exploitation. La segmentation d'images ainsi définie est un domaine vaste où l'on retrouve de très nombreuses approches, que l'on peut regrouper en trois principales catégories :

- Segmentation fondée sur les contours,
- Segmentation fondée sur les régions,
- Segmentation hybrides

L'état de l'art qui sera effectué dans la première partie de ce chapitre exploite quelques méthodes couramment rencontrées dans l'analyse et la description des images satellitaires de TSM. Nous appliquons essentiellement, à titre d'illustration, les différentes techniques de segmentation que nous présenterons sur trois images TSM, représentant trois problèmes courant rencontrés lors de la détection de l'upwelling tout au long de la côte atlantique marocaine. La Fig. 3.1 montre trois images : image TSM avec de fort gradients thermiques caractérisés par des zones de transitions claires entre les eaux froides près de la côte et les chaudes du large ; image TSM avec des fronts thermiques lisses et pas bien prononcés ; image TSM avec des zones nuageuses sur la région d'intérêt empêchant toute mesure sur les pixels de la mer.

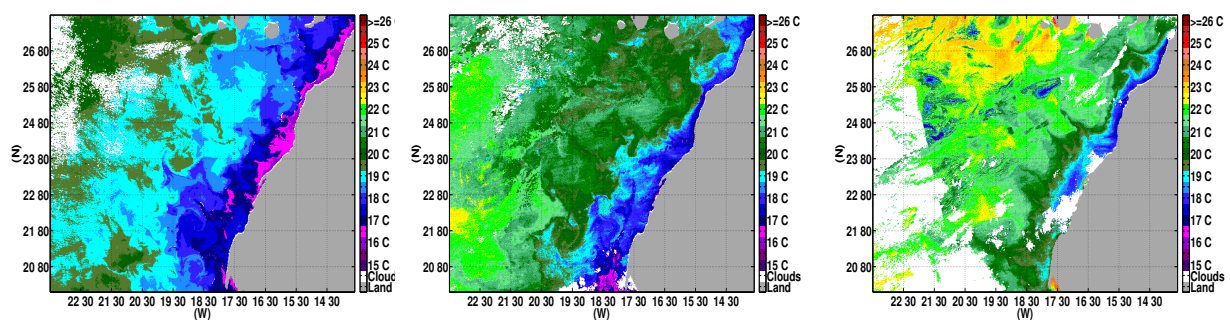


FIGURE 3.1 – Images TSM utilisées tout au long de ce travail afin de tester les différentes techniques de segmentation. **De gauche à droite** : images obtenus le 2007-01-02, le 2008-12-45, et le 2007-08-16.

Les pixels de couleur grise dans la partie droite des images de la Fig. 3.1 représentent des pixels de la terre. Par contre, les pixels de couleur blanche représentent des acquisitions de nuages.

3.1.2 Segmentation par approche contour

La segmentation par détection des contours est une étape fondamentale qui se situe entre, d'une part, l'acquisition de l'image et son amélioration et, d'autre part, sa description et la prise de décision finale. Les contours constituent en effet des indices riches, pour toute interprétation ultérieure de l'image. En général, les contours sont caractérisés par une forte variation (ou discontinuité) de la pente du gradient. Dans le cas des images de niveau de gris, le contour représente une discontinuité de la fonction d'intensité $f(i, j)$ caractérisant l'image. Le principe de la détection de contours repose donc sur l'étude des dérivées de la fonction d'intensité dans l'image : les extrema locaux du gradient de la fonction d'intensité et les passages par zéro du Laplacien. Cette approche cherche à exploiter le fait qu'il existe une transition détectable entre deux régions connexes.

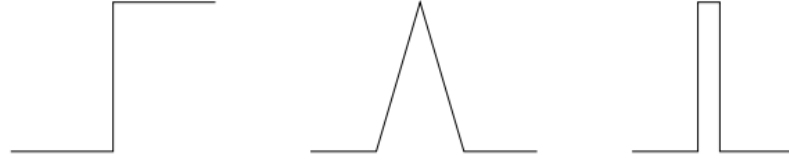


FIGURE 3.2 – Différents types de contours : marche d'escalier, toit et pointe.

Les différentes techniques existantes en détection des contours se classent suivant la manière d'estimer les dérivées de la fonction d'intensité :

- Différences finies,
- Filtrage optimal.

Dérivation par différence finie

Compte tenu de la nature discrète des images, les premières approches les plus simples ont donc consisté à approximer les dérivées par des différences finies :

$$\frac{\partial I(x, y)}{\partial x} = I(x + n, y) - I(x, y), \quad \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} = I(x, y + n) - I(x, y) \quad (3.4)$$

avec, en général $n = 1$ (où n est le plus souvent égale à l'unité ; il représente le pas de discrétisation ou période d'échantillonnage).

En ce sens, l'opérateur du gradient,

$$\nabla I(x, y) = \left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \right)^t, \quad (3.5)$$

caractérisé par son module et sa direction :

$$|\nabla I|(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \right)^2}, \quad \phi(x, y) = \arctan \left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial y} / \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \right) \quad (3.6)$$

permet de détecter des discontinuités de la fonction d'intensité (Fig. 3.3).

On trouve aussi les dérivées partielles secondes qui utilisent l'opérateur isotrope Laplacien défini par :

$$\nabla^2 I(x,y) = \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial y^2}, \quad (3.7)$$

où les notations $\frac{\partial^2}{\partial x^2}$ et $\frac{\partial^2}{\partial y^2}$ désignent respectivement les dérivées partielles secondes dans les directions x et y .

En général, ces dérivées sont calculées par convolution de l'image avec un masque de différences. Sur ce principe, plusieurs masques de convolution ont été proposés dans la littérature afin d'estimer le module du gradient : masque de Roberts, masque de Prewitt, masque de Sobel et masque de Kirsch (Jain, 1989).

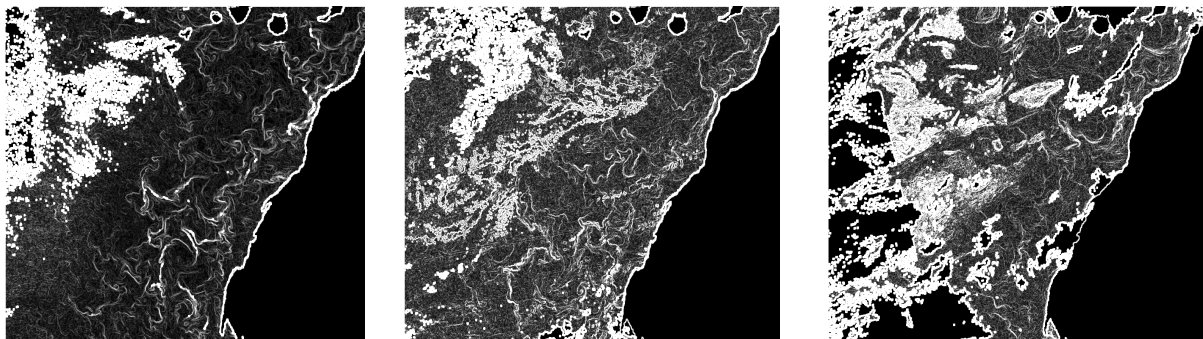


FIGURE 3.3 – Détection des contours par l'application de la norme du gradient sur respectivement les images de la Fig. 3.1.

L'inconvénient principal de ces opérateurs réside dans leur forte sensibilité au bruit (les nuages dans le cas des images de la TSM) du fait de l'implantation de la dérivation qui se traduit par un filtrage passe-haut. Aussi, la qualité de la segmentation dépend fortement de la taille des masques ; l'agrandir signifie augmenter la qualité des résultats obtenus et par conséquent accroître le temps de calcul. En général, tous les opérateurs précédents fournissent des résultats peu significatifs sur des données telles que les images de la TSM (Fig. 3.4 et Fig. 3.5).

Dérivation par filtrage optimal

Les approches de dérivation par différence finies sont basées sur une modélisation assez simple d'un contour idéal (Fig. 3.2). A cet effet, un autre type d'approche plus récent repose sur la définition de critères d'optimalité de la localisation et de la détection ; ces critères reposent sur des filtres de lissage optimaux. Dans cette catégorie, le filtre de Canny (Canny, 1986) est réalisé en convoluant le signal par un filtre de réponse impulsionnelle finie ; il propose une approximation par la dérivée 1ère d'une gaussienne. Pour cela, il définit de façon mathématique trois critères d'optimalité :

- Détection : le contour doit être bien détecté en minimisant les fausses réponses,
- Localisation : le contour doit être localisé avec certitude en optimisant la précision avec laquelle le contour est détecté,

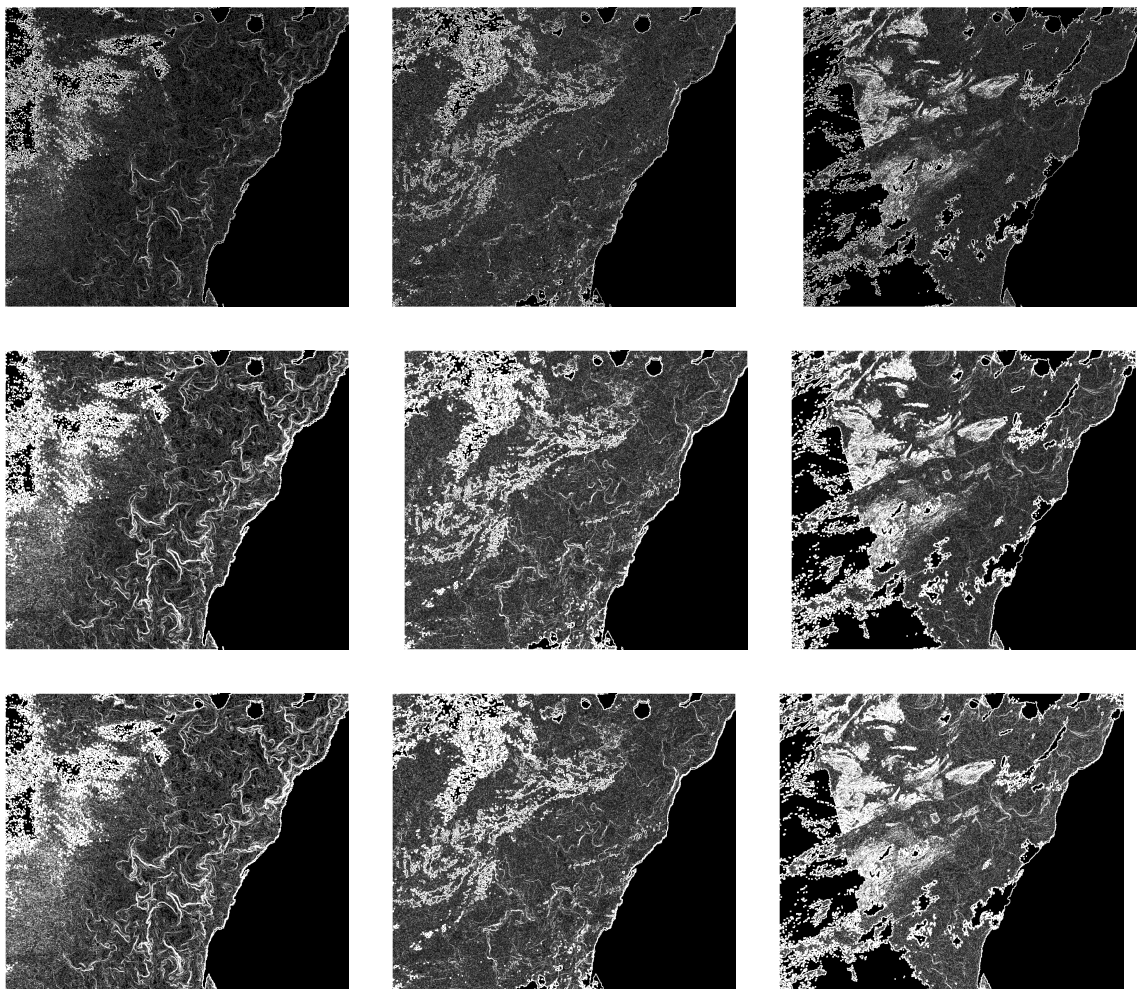


FIGURE 3.4 – Détection des contours sur les images de la Fig. 3.1. **De haut en bas** : norme du gradient de Roberts, norme du gradient du Prewitt et norme du gradient de Sobel.

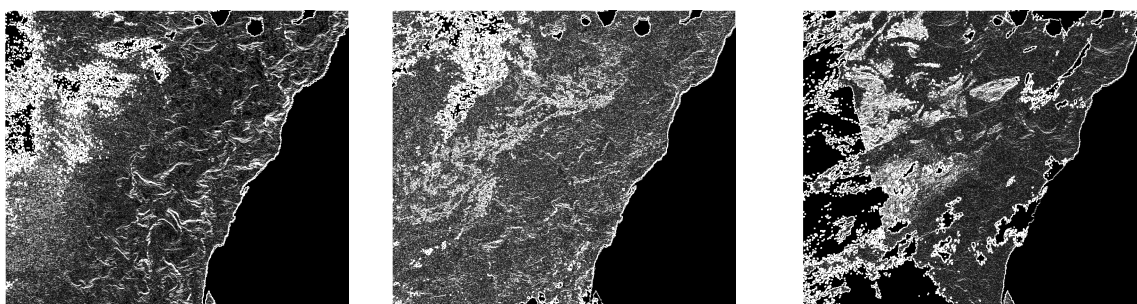


FIGURE 3.5 – Détection des contours par l'application de l'opérateur de Kirsh sur respectivement les images de la Fig. 3.1.

- Réponse unique : le contour doit provoquer une réponse unique pour un seul contour en évitant les effets de bords.

Plusieurs auteurs ont été intéressés par l'application du critère de Canny pour la détection des structures thermiques dans les images de la TSM (Oram et al., 2008; Belkin and O'Reilly, 2009; Nieto et al., 2012). Effectivement, les résultats trouvés par l'application de ce critère laissent entrevoir son utilité dans la détection des structures océaniques à mésoéchelles (Fig. 3.6). Cependant ces opérateurs supposent un modèle de contour assez simple (discontinuités de type marche Fig. 3.2) et inadapté aux contours réels au sein des images de la TSM. Une autre contrainte réside dans le fait que la méthode de Canny nécessite le réglage a priori des paramètres heuristiques tels que le seuillage et la variance.

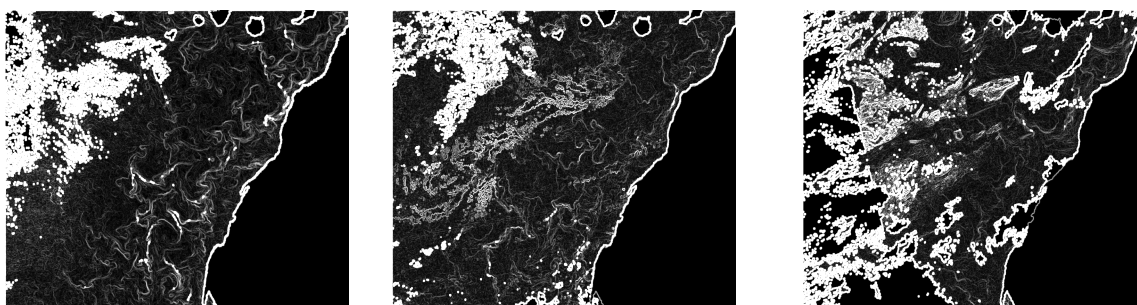


FIGURE 3.6 – Détection des contours par l'application de l'opérateur de Canny sur respectivement les images de la Fig. 3.1.

3.1.3 Segmentation par approche région

Les méthodes appartenant à la famille de segmentation par approche région opèrent directement sur les régions en cherchant des zones R_i dans l'image qui possèdent des pixels avec des propriétés communes. Il y a principalement deux types de méthodes de segmentation qui adoptent cette approche : les méthodes de type décomposition/fusion et les méthodes de classifications.

Méthodes par décomposition/fusion

Les algorithmes de décomposition/fusion cherchent à fusionner des régions (ou pixels) ayant des caractéristiques similaires. En effet, la méthode de fusion par croissance de régions est une technique courante de cette catégorie (Chang and Li, 1994) qui a pour principe de faire croître une région par agrégation libre de pixels. On part d'un premier ensemble de régions (i.e. points germes), qui grandissent par incorporation des pixels les plus similaires suivant un critère donné, tel que la différence entre le niveau de gris du pixel considéré et le niveau de gris moyen de la région.

L'utilisation de ce type de méthode sur les images de la TSM permet de détecter grossièrement les zones d'upwelling (Tamim et al., 2014c) (Fig. 3.7). En contrepartie, la connaissance a priori des critères qui varient fortement d'une image à une autre constitue une contrainte très forte. En effet, la segmentation est rendue très difficile par l'influence de la position initiale des points germes, le choix des conditions d'arrêt, le temps de calcul important, et la sensibilité liée au bruit. Un autre problème relatif à cette catégorie de segmentation réside dans les limites des

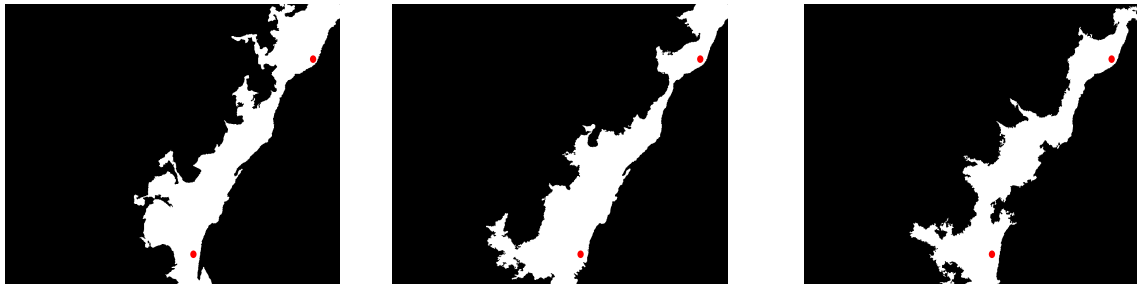


FIGURE 3.7 – Extraction de la région d’upwelling en utilisant la méthode d’accroissement de régions sur respectivement les images de la Fig. 3.1. Les points rouges représentent grossièrement les pixels qui servent de points de départ ; ces points sont choisis par un expert océanographe en se basant sur les connaissances techniques et scientifiques à priori de notre région d’étude.

régions obtenues qui sont habituellement imprécises et ne coïncident pas exactement avec les limites des objets de l’image de la TSM (Fig. 3.7).

Méthodes de classification

Les méthodes de classification consistent à diviser l’ensemble des pixels d’une image I en un nombre C de sous-ensembles (i.e. classe) en se basant sur des régions dont on connaît les classes d’appartenance a priori : on parle de classification supervisée, ou non, dans ce cas on parle de classification non-supervisée ou classification automatique (Duda and Hart, 1973). Une classe représente une famille de pixels ayant des propriétés communes et qui identifie ainsi une ou plusieurs régions présentant des caractéristiques physiques (par exemple les régions d’upwelling, non-upwelling, terre, nuages dans les images de la TSM). La qualité des résultats obtenus dépend grandement de la robustesse des classes.

Les algorithmes non-supervisés ont connu un regain d’intérêt très important, particulièrement, dans le cadre de la segmentation automatique des images de TSM où le schéma couramment retenu est celui d’une classification non-supervisée en utilisant des techniques usuelles d’analyse de données (Tamim et al., 2013). Dans cette catégorie plusieurs méthodes ont été développées, la plus populaire est celle des k -moyennes (k -means), elle doit sa popularité à sa simplicité et sa capacité de traiter de larges ensembles de données (MacQueen, 1967) (Fig. 3.8).

La difficulté des méthodes de classification non-supervisées réside dans la détermination du nombre de classes présentes dans l’image ainsi des niveaux de gris délimitant chaque classe (Tamim et al., 2013). En particulier, les images de TSM présentent des régions d’upwelling avec une dynamique très faible : la différence de température maximale entre les régions d’upwelling est de l’ordre de 2°C . Nous reviendrons plus en détail, dans la deuxième partie de ce chapitre sur les méthodes de classification automatiques des images de la TSM.

3.1.4 Segmentation par approche hybrides

La segmentation par utilisation de l’approche hybride (région/contour) suscite un grand intérêt ces dernières années. Cette approche consiste en une coopération entre la segmentation par régions et la segmentation par contours. Elle exploite les avantages de ces deux types de

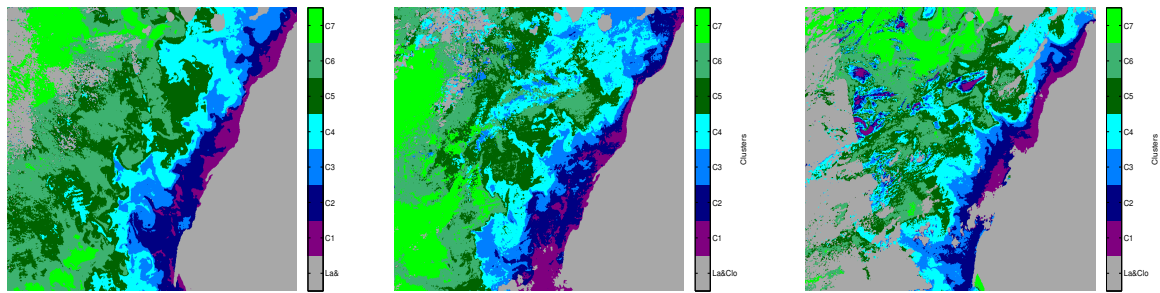


FIGURE 3.8 – Segmentation en 7 classes par classification sur l'espace de luminance en utilisant l'algorithme k -means sur respectivement les images de la Fig. 3.1.

segmentation pour aboutir à un résultat de segmentation plus précis et plus fidèle que celui obtenu à l'aide d'une seule technique. Dans ce contexte, nous abordons le principe de la diffusion non-linéaire basé sur l'équation de la chaleur et nous présentons les outils de la morphologie mathématique pour la segmentation des images de TSM.

Diffusion non-linéaire

La diffusion permet d'homogénéiser une image de même que la diffusion de température en physique homogénéise la température des objets. En effet, la chaleur se propage d'un point à un autre, de proche en proche, et tend ainsi à se répartir uniformément au fur et à mesure que le temps s'écoule. La même chose se produit en traitement d'images où les niveaux de gris sont diffusés de proche en proche traduisant ainsi une diminution des irrégularités des niveaux de gris, et résultant d'un niveau de gris plus uniforme.

Utilisée en traitement d'image, la diffusion intervient souvent en pré-traitement, de façon à supprimer les perturbations locales du signal. Il est alors possible dans un second temps d'effectuer une recherche des contours, par exemple, en minimisant la perturbation due au bruit.

$$\frac{\partial I(x,y,t)}{\partial t} = c \cdot \nabla I(x,y,t) \quad (3.8)$$

Cela revient à faire directement la convolution de l'image avec une gaussienne. En particulier, cette équation à l'inconvénient de rendre les contours de plus en plus flous au cours des différentes itérations. Pour éviter d'effacer progressivement les contours, Perona et Malik (Perona and Malik, 1990) ont proposé de modifier l'équation de diffusion pour faire de la diffusion anisotrope (i.e. non-linéaire). Les auteurs appliquent un procédé non uniforme qui réduit la diffusion dans les zones à fort gradient. Ils proposent donc d'utiliser une équation plus générale que la première (Eq. 3.8) :

$$\frac{\partial I(x,y,t)}{\partial t} = \text{div}(c(x,y,t) \cdot \nabla I(x,y,t)), \quad (3.9)$$

avec c le coefficient de conduction. Ce coefficient doit être proche de 0 au niveau des contours et proche de 1 dans les zones à homogénéiser. La méthode de Perona et Malik propose d'utiliser la norme 2 du gradient comme estimateur de présence des contours, suivant le principe suivant :

- un gradient élevé représente une forte probabilité de présence d'un contour
- un gradient faible représente une faible probabilité de présence d'un contour

En général, les filtres de diffusion donnent de bons résultats comparés à ceux obtenus par une diffusion simple. Cependant, ce n'est pas le cas pour les images infrarouge de TSM où nous pouvons remarquer que la diffusion a tendance à :

- déplacer les contours,
- augmenter le lissage dans les régions homogènes qui contiennent un peu de bruit.

La Fig. 3.9 montre un exemple de la diffusion non-linéaire de Perona et Malik sur les images de TSM.

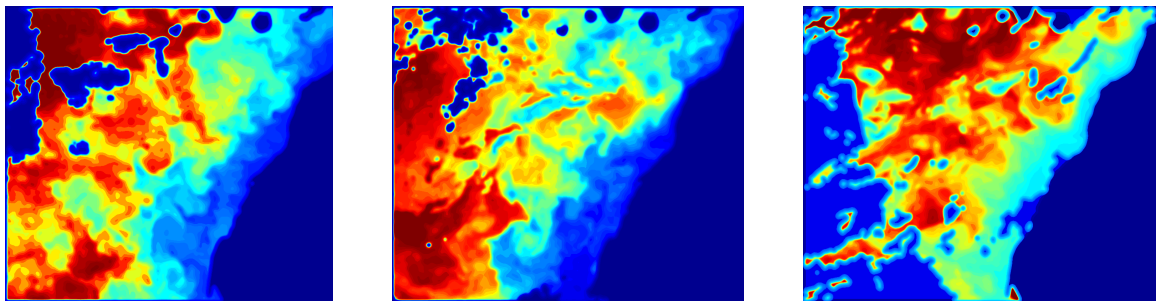


FIGURE 3.9 – Résultat du processus de diffusion non-linéaire de Perona et Malik permettant de détecter les pixels appartenant à des contours sur respectivement les images de la Fig. 3.1.

Méthodes morphologiques

La morphologie mathématique (Matheron, 1975; Serra, 1982) trouve un immense champ d'applications, en particulier dans la détection des structures thermiques dans les images de TSM (Holyer and Peckinpaugh, 1989; Marcello et al., 2005). Cette technique repose sur le principe consistant à comparer des structures inconnues (images de TSM) à un ensemble de formes, les éléments structurants B , dont on maîtrise les caractéristiques. La comparaison est effectuée à travers de nombreuses relations booléennes.

Opérateur de dilatation

Pour chaque position de l'élément structurant B sur l'image I , si un, au moins, des pixels de B fait partie de I , alors l'origine de B appartient à l'image générée. La dilatation de I par l'élément structurant B est notée par $I \oplus B$ ou par $D(I, B)$.

Opérateur d'érosion

Pour chaque position de l'élément structurant B sur l'image I , si tous les pixels de B font partie de I , alors l'origine de B appartient à l'image générée. L'érosion de I par l'élément structurant B est notée par $I \ominus B$ ou par $E(I, B)$.

Opérateur d'ouverture

L'opérateur d'ouverture est la composition d'une dilatation morphologique avec l'érosion en utilisant le même élément structurant B . Cet opérateur permet d'isoler les surfaces présentes dans l'image et de lisser les contours,

$$(I \ominus B) \oplus \bar{B} \quad (3.10)$$

On note \bar{B} la transposée de B (symétrie par rapport à l'origine).

Opérateur de fermeture

L'opérateur de fermeture est réalisé en utilisant une dilatation par B puis une érosion par la transposée de B . Il permet de recoller des morceaux de surfaces proches de manière à fermer des contours disjoints.

$$(I \oplus B) \ominus \bar{B} \quad (3.11)$$

Gradient morphologique

Le gradient morphologique se définit comme la différence entre le dilaté de I par l'élément structurant B et l'érodé de I par B :

$$\|\nabla I\| = \frac{1}{2}(D(I, B) - E(I, B)) \quad (3.12)$$

Il mesure en chaque point de l'image la différence entre le maximum et le minimum des niveaux de gris sur le voisinage défini par l'élément structurant B .

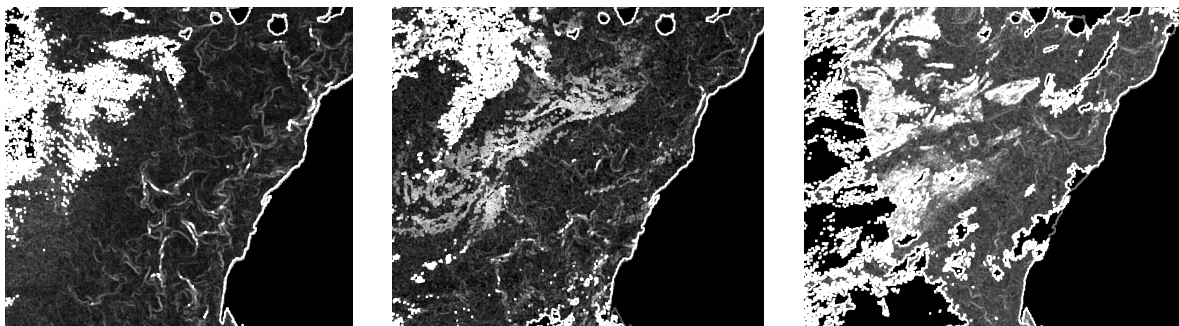


FIGURE 3.10 – Gradient morphologique sur les images originales de la Fig. 3.1.

Tous ces opérateurs morphologiques ont des performances comparables voire supérieures à ceux des schémas conventionnels basés sur la combinaison de filtres et de gradients linéaires (Vliet et al., 1989) et nécessitent moins d'opérations. Toutefois, ces opérateurs sont rendus plus robustes si un filtrage usuel précède leur emploi. Dans le cas des images de TSM, il est couramment reconnu que les résultats obtenus sont très peu significatifs (Cayula et al., 1991) (Fig. 3.10).

3.1.5 Discussion

Dans cette première partie, nous avons présenté des résultats obtenus avec différentes méthodes de segmentation. Les résultats évoqués laissent entrevoir les limitations des techniques de segmentation classiques pour la détection des structures d'intérêt dans les images de TSM. Ces limitations sont principalement liées à la nature des images à traiter. En effet, les images de TSM présentent des contours irréguliers avec une dynamique très faible sur les zones d'upwelling. Cependant, les méthodes de segmentation basées sur les approches régions : méthode des *k*-means, permettent généralement d'obtenir des résultats intéressants et elles ont rencontré un grand succès dans l'analyse d'images océanographiques. Il nous paraît donc utile de proposer une méthode qui prend en particulier en compte les informations basées sur les régions dans l'analyse des images de TSM. Dans la continuation de ce chapitre, nous allons nous concentrer sur les approches de segmentation basées sur les régions, plus particulièrement, nous allons analyser les méthodes de classification automatique des images satellitaires. Par la suite, nous essayons de combiner plusieurs techniques de segmentation afin de résoudre le problème des nuages et des artefacts rencontrés dans les images de TSM.

3.2 Classification automatique des zones d'upwelling

Comme nous l'avons souligné précédemment (première partie de ce chapitre), la segmentation par classification des images de TSM pour la détection des zones d'upwelling est une des applications importantes étudiées en océanographie ; elle a contribué à l'alimentation de nombreux travaux sur l'analyse des structures thermiques. La classification quant à elle cherche à identifier des groupes avec des pixels similaires dans le but de mieux découvrir la distribution et la corrélation entre les objets de l'image. Elle consiste à définir des attributs descriptifs de l'image, puis à utiliser une technique de classification à partir de ces attributs pour extraire les régions distinctes et homogènes (Jain and Dubes, 1978). L'utilisation de cette approche dans la détection des zones d'upwelling est très prometteuse dans le cas où l'on considère que l'upwelling côtier est caractérisé par une zone froide et homogène par rapport aux eaux chaudes et hétérogènes du large (Tamim et al., 2013). Néanmoins, le choix des attributs permettant de décrire les caractéristiques des régions de l'image ainsi que le choix d'une méthode de classification, permettent d'envisager de nombreuses approches.

3.2.1 Paramètres de classification

Les méthodes utilisées pour la classification et la segmentation des images consistent à définir des paramètres suffisamment pertinents permettant de discriminer et classer les paramètres observés dans autant d'ensembles cohérents et distincts. Dans la littérature, on trouve deux grandes familles d'attributs discriminants : les paramètres spectraux, mesurant l'information de nature spectrale de l'image, et les paramètres texturaux, caractérisant son comportement textuel.

Classification basée sur l'information spectrale

L'information de nature spectrale est largement utilisée pour classer les pixels d'une image de TSM (Cayula and Cornillon, 1992; Nascimento et al., 2012). Elle consiste à exploiter

les niveaux de gris dans une image (Acton, 1996). La classification des attributs de luminances peut s'effectuer à partir de l'histogramme des niveaux de gris permettant de segmenter les objets d'images en différentes classes homogènes ou par des méthodes bien plus complexes.

Classification basée sur l'information textuelle

Bien que les algorithmes les plus fréquents ne tiennent compte que de l'information spectrale afin de discriminer les structures présentes dans les images, d'autres méthodes utilisent des attributs de description des textures (Haralick, 1979). Celles-ci ont en effet trouvé de nombreuses applications et rencontré un large succès en segmentation d'images satellitaires et notamment dans la détection des structures océaniques à méso-échelle. En effet, les attributs textuels sont largement utilisés afin d'identifier et de discriminer, sur des données AVHRR de TSM, différents types de structures thermiques (Holyer and Peckinpaugh, 1989). En particulier, les matrices de cooccurrence (GLC) sont couramment utilisées comme un outil d'analyse de texture (Haralick, 1979; Ballard and Brown, 1982; Harlow et al., 1986); elles mesurent la fréquence d'apparition relative, $P(i, j|\Delta x, \Delta y)$, avec laquelle deux éléments (pixels de niveau de gris i et j), séparés par une distance donnée $(\Delta x, \Delta y)$, se répète dans une image. Mathématiquement parlant, si on considère une image de $M \times N$ pixels (ou une fenêtre d'analyse locale au sein de cette image qui permet de définir la valeur locale d'un attribut en chaque pixel de l'image) où L est le niveau de gris variant de 0 à $(L - 1)$ et $f(m, n)$ représente le niveau d'intensité du pixel avec les coordonnées m et n , alors :

$$P(i, j|\Delta x, \Delta y) = \sum_{m, n} A \begin{cases} A = \frac{1}{[(M-\Delta x) \times (N-\Delta y)]}, & \text{si } f(m, n) = i \text{ et } f(m + \Delta x, n + \Delta y) = j \\ A = 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.13)$$

Les deux pixels à la position (m, n) et $(m + \Delta x, n + \Delta y)$ ne doivent pas dépasser le support de l'image $M \times N$ (ou la taille de la fenêtre d'analyse dans l'image). $P(i, j|\Delta x, \Delta y)$ est une matrice de dimension $L \times L$ de probabilités de second ordre.

En général, dans l'analyse de la texture, des attributs sont généralement extraits de la matrice de cooccurrence en appliquant des fonctions de pondération à tous les éléments de la matrice et en sommant les valeurs pondérées de ces éléments. En variant la nature de la fonction de pondération, on fait varier la nature de l'information extraite de la matrice de cooccurrence (Longstaff et al., 1995). Six attributs sont généralement considérés comme les plus significatifs pour l'analyse de la texture : le contraste, l'énergie, l'homogénéité, la corrélation, l'entropie et la variance :

$$\begin{aligned} \text{Contrast} &= \sum_{i, j=1}^L (i - j)^2 P(i, j|\Delta x, \Delta y) & \text{Energy} &= \sum_{i, j=1}^L P(i, j|\Delta x, \Delta y)^2 \\ \text{Correlation} &= \frac{1}{\sigma_i \sigma_j} \sum_{i, j=1}^L (ij) P(i, j|\Delta x, \Delta y) - \mu_i \mu_j & \text{Entropy} &= - \sum_{i, j=1}^L P(i, j|\Delta x, \Delta y) \log(P(i, j|\Delta x, \Delta y)) \\ \text{Homogeneity} &= \sum_{i, j=1}^L \frac{1}{1 + |i - j|} P(i, j|\Delta x, \Delta y) & \text{Variance} &= \sum_{i, j=1}^L (i - \mu_i)(j - \mu_j) P(i, j|\Delta x, \Delta y) \end{aligned}$$

où $P(i, j|\Delta x, \Delta y)$ est la probabilité qu'un couple de pixels séparés par la translation Δx et Δy ait

pour valeurs respectives i et j . μ_i , μ_j et σ_i , σ_j sont respectivement les moyennes et les écarts-types de la matrice de cooccurrence GLC calculés le long des lignes x et des colonnes y :

$$\begin{aligned}\mu_i &= \sum_{j=1}^L i P(i, j | \Delta x, \Delta y) & \mu_j &= \sum_{i=1}^L j P(i, j | \Delta x, \Delta y) \\ \sigma_i^2 &= \sum_{j=1}^L (i - \mu_i)^2 P(i, j | \Delta x, \Delta y) & \sigma_j^2 &= \sum_{i=1}^L (j - \mu_j)^2 P(i, j | \Delta x, \Delta y)\end{aligned}$$

Les résultats de l'analyse de ces méthodes sur nos images, permettent d'entrevoir l'utilité de la description des images de la TSM par les attributs texturaux ; elles permettent de décrire les relations statistiques et spatiales entre les niveaux de gris. En revanche, l'application de ces attributs sur notre base de données d'images présente plusieurs limitations. En effet, les structures des fronts thermiques ne sont pas bien capturées par ces attributs et les résultats trouvés mettent en évidence la faible dynamique des données de la TSM. Une autre limitation réside dans le choix des modèles de textures adaptés aux données TSM ainsi que la définition et la sélection des différents paramètres avant chaque analyse. Du point de vue algorithmique, l'extraction des attributs et la réalisation par la suite d'une segmentation non-supervisée sont très coûteuses en temps de calcul et nécessite l'utilisation de toutes les ressources de l'ordinateur. Par ailleurs, dans le cadre de l'analyse d'images satellitaires de la TSM, la description utilisant l'information spectrale (espace de luminance), a rencontré un grand succès et a notamment produit des résultats significatifs pour la classification des structures thermiques.

3.2.2 Méthodes de classification

Les méthodes de classification peuvent se distinguer en deux types (Duda and Hart, 1973) : le premier, dit supervisé, visant principalement à définir des règles permettant de classer des objets dans des classes bien déterminées à partir d'un échantillon utilisé dans la phase d'apprentissage ; le deuxième type d'approches, dit non supervisé ou classification automatique, permet de classer les objets sans avoir une idée a priori sur la sortie.

Dans le cadre de la classification des images de la TSM, le schéma couramment adopté est celui d'une classification non-supervisée. En effet, en océanographie la vérité-terrain est un terme de "jargon" pour représenter les observations à proximité de la surface. Le but de ces observations est d'assister l'étalonnage et l'interprétation des études effectuées à distance en contrôlant la réalité au sein de la scène elle-même. Ce sont des observations ou des mesures océanographiques in-situ (ex. données des bouées). Ces mesures s'utilisent généralement comme un support solide afin de valider les résultats obtenus en exploitant les images satellitaires. Toutefois, ces observations sont très complexes à acquérir et à mettre en oeuvre à cause de la non-disponibilité de ces mesures pour chaque image de la TSM et pour chaque point de la côte atlantique marocaine. Dans ce sens, l'utilisation des méthodes de classification non-supervisée constitue une forte contrainte dans le traitement des images de la TSM.

La classification vise à identifier des groupes avec des pixels similaires, en ce sens, différents type de classifications peuvent être distingués selon l'algorithme utilisé : méthodes de partitionnement, méthodes hiérarchiques, méthodes basées sur la théorie des graphes, et les méthodes basées sur les fonctions objectives. Dans cette étude nous nous sommes concentrés

sur les méthodes de partitionnement, et en particulier, l'analyse des méthodes de classification "floue" (Leski, 2003) et les méthodes de classification "dure" (Guerrero-Bote et al., 2003).

3.2.2.1 Clusters

Plusieurs définitions peuvent être attribuées à une classe ou cluster selon l'objectif de la classification. En général, on peut accepter la définition qu'un cluster est un groupe d'objets (ou pixels) qui ont les mêmes caractéristiques spectrales (ou presque) ; on parle alors de notion de similarité entre les clusters. La similarité entre les objets doit être définie dans un sens purement mathématique où elle est souvent assimilée à une distance entre les différents vecteurs de données ou par une distance entre un vecteur de donnée et un objet caractéristique du cluster (cluster prototype).

Dans une image, les clusters peuvent avoir des formes différentes : sphérique, linéaire ou creuse. La performance de la plupart des algorithmes de classification est influencée non seulement par les formes géométriques et les densités des clusters mais aussi par leurs relations spatiales et leurs distances. Les clusters peuvent être disjoints, où chaque objet appartient à un et un seul cluster, ou en chevauchement de telle sorte que chaque objet appartient simultanément à deux ou plusieurs clusters.

3.2.2.2 Partitionnement

Étant donné que les clusters peuvent être formellement considérés comme des sous-ensembles de l'ensemble de données, une catégorisation possible des méthodes de classification peut se faire selon que les sous-ensembles sont flous ou nets (on parle alors respectivement de classification floue et dure). Les méthodes de classification dure sont basées sur la théorie des ensembles classiques, où chaque objet appartient ou n'appartient pas à un cluster donné. En effet, si on considère une image $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ de n pixels, la classification dure vise à rassembler les pixels de l'image en un nombre déterminé de sous-ensembles disjoints c . En contrepartie, les méthodes de classification floue permettent aux objets d'appartenir à plusieurs clusters simultanément, avec différents degrés d'appartenance. L'image I est ainsi partitionnée en c sous-ensembles flous.

Dans de nombreuses situations réelles, la classification floue est considérée plus efficace que la classification dure, dans le cas où les objets sur les frontières des classes n'appartiennent pas totalement à une seule classe. Dans ce cas, chaque objet se voit attribuer une valeur d'appartenance entre 0 et 1 indiquant son appartenance à une classe. Le but final des techniques de classification automatique est de générer la matrice de partition $\mathbf{U} = [\mu_{ik}]$, qui est donnée par :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mu_{1,1} & \mu_{1,2} & \dots & \mu_{1,c} \\ \mu_{2,1} & \mu_{2,2} & \dots & \mu_{2,c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n,1} & \mu_{n,2} & \dots & \mu_{n,c} \end{bmatrix}$$

Partitionnement dur

L'objectif du clustering est de partitionner une image I en c clusters. Pour le moment, on suppose que c est bien connu à partir des informations au préalable (Bezdek, 1981). En

utilisant les ensembles classiques, le partitionnement dur est défini comme une famille de sous-ensembles $\{I_i | 1 \leq i \leq c \subset P(I)\}$. Dans ce cas, la matrice de partition $\mathbf{U} = [\mu_{ik}]$ est représentée par :

$$\begin{aligned} \mu_{ik} &\in \{0, 1\}, \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq c, \\ \sum_{k=1}^c \mu_{ik} &= 1, \quad 1 \leq i \leq n \\ \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c \mu_{ik} &= n, \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq c, \end{aligned}$$

où μ_{ik} est la fonction caractéristique du sous-ensemble I_i , elle représente le degré d'appartenance de l'élément i -th au k -ème cluster. Dans la classification dure la valeur de μ_{ik} peut être soit zéro soit un.

Partitionnement flou

Le partitionnement flou est considéré comme une généralisation du partitionnement dur. Il permet aux éléments μ_{ik} d'atteindre des valeurs réelles entre $[0, 1]$. La matrice de partition vérifie les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \mu_{ik} &\in [0, 1], \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq c, \\ \sum_{k=1}^c \mu_{ik} &= 1, \quad 1 \leq i \leq n \\ \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c \mu_{ik} &= n, \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq c, \end{aligned}$$

La i -ème colonne de la matrice de partition \mathbf{U} contient les valeurs de la fonction d'appartenance de l'ensemble flou i à l'image I . L'équation en dessus montre que la somme de chaque colonne est égale à 1, et par conséquent la valeur totale d'appartenance de chaque I_k à I est égale à 1.

3.2.3 Application à la détection des zones d'upwelling

La détection des structures d'intérêt dans une image de la TSM, nécessite tout naturellement de préciser ce que l'on recherche dans cette image et par conséquence, de définir des quantités mesurant la pertinence des objets à extraire. A ces fins, l'utilisation des approches basées sur la classification dure et floue sont parmi les approches qui ont rencontré un grand succès dans l'analyse des images de la TSM et particulièrement dans la détection du phénomène d'upwelling (Tamim et al., 2013; Nascimento et al., 2012).

3.2.3.1 Algorithme de K-means

La méthode de partitionnement k -means est une technique de classification classique qui reste actuellement la méthode la plus utilisée, en particulier pour les images avec un nombre de pixels important (le cas des images satellitaires). En effet, à l'instar des méthodes hiérarchiques, cette méthode a l'avantage d'être efficace, rapide et très simple à implémenter (Forgy, 1965; MacQueen, 1967). C'est une méthode dont le but est de diviser les pixels de l'image en c

classes (ou clusters) homogènes dans lesquelles chaque pixel appartient à la partition avec la moyenne la plus proche.

Étant donné une image $\mathbf{I} = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, l'algorithme k -means associe chaque pixel I_i à l'un des $\mathbf{c} = \{c_1, c_2, \dots, c_c\}$ clusters, afin de minimiser la distance entre les points à l'intérieur de chaque partition :

$$\arg \min_c \sum_{k=1}^c \sum_{i \in c_k} \|I_i - v_k\|^2, \quad (3.14)$$

où c_k est l'ensemble des objets dans le cluster k , et v_k la moyenne de ces objets dans le cluster k . L'équation (3.14) représente une variance interclasse.

$$v_k = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} I_j}{N_k}, \quad I_j \in c_k, \quad (3.15)$$

avec N_k le nombre de pixels dans le clusters c_k .

L'application de la méthode de k -means pour la classification des images de la TSM est très prometteuse (voir Fig. 3.8), elle permet de détecter les zones d'upwelling les plus homogènes possibles (en terme de température) et ainsi permet donc d'apporter une solution à la segmentation des images de la TSM.

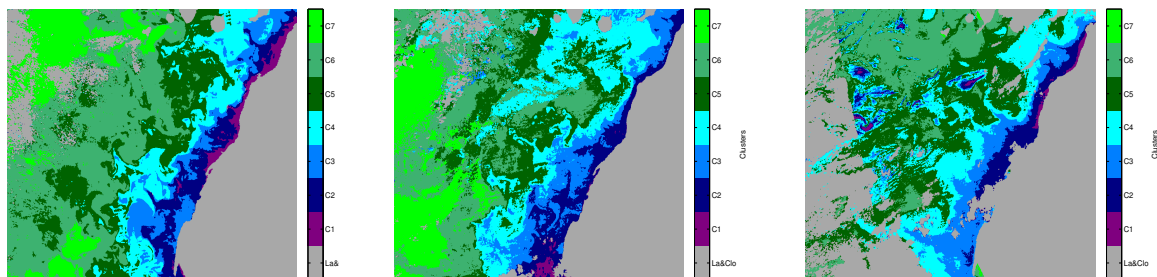


FIGURE 3.11 – Segmentation en 7 classes par seuillage sur l'espace de luminance en utilisant l'algorithme d'Otsu sur les images de la Fig. 3.1.

3.2.3.2 Algorithme d'Otsu

Dans la classification, lorsque les classes sont déterminées par le choix d'un seuil, on parle alors de méthodes de seuillage. Les pixels appartenant à une même classe et étant connexes forment des régions de l'image. Le seuillage d'une image est le procédé de segmentation le plus simple, consistant à dire que tout objet se différencie de l'arrière-fond ou d'un autre objet. Comme l'outil de segmentation par seuillage est conceptuellement simple, certains auteurs ont amélioré la segmentation en imaginant des techniques de détermination optimale du seuil. En particulier, la méthode d'Otsu est largement utilisée comme une méthode de seuillage automatique d'image en se basant uniquement sur l'histogramme des fréquences, i.e. $P(i)$ est la proportion de pixels de niveau de gris i (Otsu, 1979).

Le principe de la méthode de seuillage Otsu consiste à trouver le seuil t qui minimise la variance intra-classe (ω' = within clusters) à partir de tous les seuillages possibles :

$$\sigma_{\omega}^2(t) = \omega_1(t) \sigma_1^2(t) + \omega_2(t) \sigma_2^2(t), \quad (3.16)$$

les poids ω_i représentent la probabilité d'être dans la i -ème classe, chacune étant séparée par un seuil t . Finalement, les σ_i^2 sont les variances de ces classes. Dans notre cas de détection des zones d'upwelling, on est surtout intéressé par la détection de plusieurs zones d'upwelling, pour cela les auteurs dans (Liao et al., 2001) ont proposé une extension de la méthode originale d'Otsu afin d'extraire non pas une seule classe mais plusieurs classes (Fig. 3.11).

3.2.3.3 Algorithme c -moyenne floue 'Fuzzy c -means'

La méthode de classification floue, Fuzzy c -means (FCM), est basée sur la minimisation d'une fonction d'objectifs définie par (Bezdek, 1983; Dunn, 1973) :

$$\text{Minimize } J_m(I; U, V) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c (\mu_{ik})^m \|I_i - v_k\|^2 \quad (3.17)$$

n est le nombre total de pixels dans l'image I et c le nombre de clusters. v représente le vecteur des clusters centroids (centre des clusters) et $U = [\mu_{ik}]_{n \times c}$ la matrice de partition floue composée des degrés d'appartenance de l'objet I_i aux clusters c_i . $\|I_i - v_k\| = (I_i - v_k)^T (x_k - v_k)$ représente la norme euclidienne entre I_i et v_k . L'exposant de pondération m représente le degré de fuzzification qui prend ses valeurs dans l'intervalle $[0, +\infty[$. Lorsque m vaut 1, on retrouve la classification dure et lorsque m tend vers l'infini, on obtient une partition infiniment floue où les coefficients μ_{ik} tendent vers $1/c$. Par conséquent, le degré de fuzzification m possède une influence considérable sur la performance de la classification FCM. Dans cette méthode de classification floue, les vecteurs des clusters centroids et les fonctions d'appartenance résolvant le problème d'optimisation dans l'équation (3.17) sont données par :

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{ik})^m I_i}{\sum_{i=1}^n (\mu_{ik})^m}, \quad 1 \leq k \leq c, \quad (3.18)$$

$$\mu_{ik} = \left[\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|I_i - v_k\|^2}{\|I_i - v_j\|^2} \right)^{1/(m-1)} \right]^{-1}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad 1 \leq k \leq c \quad (3.19)$$

Ces dernières équations (3.18) et (3.19) constituent une procédure d'optimisation itérative. L'objectif est d'améliorer de manière itérative l'ensembles des clusters flous jusqu'à ce qu'aucune amélioration supplémentaire sur $J_m(U, V)$ ne soit possible. L'algorithme FCM est exécuté dans les étapes suivantes :

- i) Étant donné un nombre bien défini de clusters c et une valeur bien choisie de m ($2 \leq m \leq +\infty$), l'algorithme FCM initialise la fonction d'appartenance μ_{ik} de telle sorte que :

$$\sum_{k=1}^c \mu_{ik} = 1, \quad 1 \leq i \leq n \quad (3.20)$$

- ii) Calculer les clusters centroids flous v_k pour $k = 1, 2, \dots, c$ en utilisant l'équation (3.18).
- iii) Exploiter l'équation (3.19) afin de mettre à jour les fonctions d'appartenance floues μ_{ik} .
- iv) Le processus d'optimisation s'arrête lorsque la fonction objective $J_m(U, V)$ est inférieure à un certain seuil (ϵ) ; sinon revenir à l'étape de 2.

L'algorithme FCM se fait en utilisant une distance standard euclidienne, permettant ainsi d'identifier des clusters avec une forme hyper-sphérique. La classification floue s'effectue en considérant des frontières graduelles au lieu des frontières nettes entre les classes. Elle assigne donc, non pas à un pixel une étiquette relative à une classe unique, mais son degré d'appartenance à chacune des classes. Elle constitue un avantage naturel dans la détection de l'upwelling à partir des images de la TSM, en raison de la nature imprécise des données satellitaires en général et les caractéristiques du phénomène d'upwelling en particulier représentant ainsi des zones de transition avec des limites thermiques qui sont lisses. Dans Nascimento et al. (Nascimento et al., 2012), l'algorithme de Fuzzy c-means (FCM) a été appliqué sur les images de la TSM afin de segmenter les régions d'upwelling de la côte atlantique portugaise. Les résultats de l'application de la méthode FCM sur notre problème de détection de l'upwelling marocain sont illustrés dans la Fig. 3.12. Ces résultats montrent que la segmentation par FCM reproduit les formes d'upwelling dans les images de la TSM (Tamim et al., 2013, 2014b).

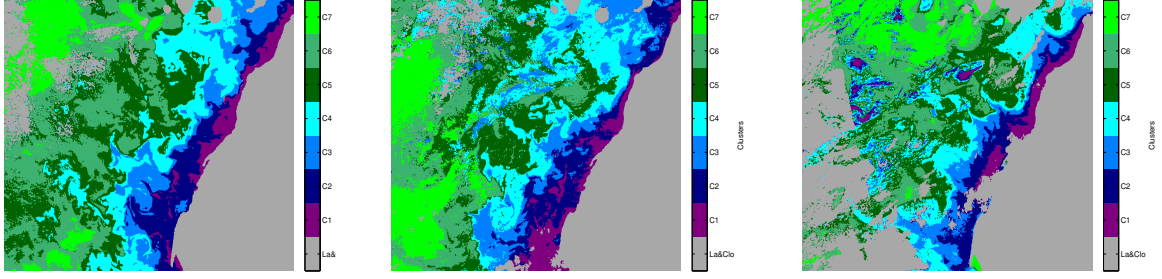


FIGURE 3.12 – Segmentation en 7 classes sur l'espace de luminance en utilisant l'algorithme de classification floue (fuzzy c-means) sur les images de la Fig. 3.1.

3.2.3.4 Algorithme de Gustafson-Kessel

L'algorithme de Gustafson-Kessel (GK) représente une extension de l'algorithme de classification floue FCM, qui utilise une distance adaptée afin de détecter des clusters avec différentes formes géométriques sur la même image (Gustafson and Kessel, 1978). Dans GK, chaque cluster a sa propre matrice d'induction A_i , ce qui revient à écrire la distance exprimée dans l'équation (3.17) par :

$$\|I_i - v_k\|_A^2 = (I_i - v_k)^T A_i (I_i - v_k), \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq c, \quad (3.21)$$

Les matrices A_i sont utilisées comme des variables d'optimisation dans la fonction objective c -means (3.17), permettant ainsi à chaque cluster d'adapter sa norme de distance à la structure topologique locale de l'image. La fonction objective de l'algorithme de GK est définie alors par :

$$J_m(I; U, V, A) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c (\mu_{ik})^m \|I_i - v_k\|_{A_i}^2 \quad (3.22)$$

Les résultats de cet algorithme sont illustrés sur la Fig. 3.13. Bien que les algorithmes Fuzzy c-means et Gustafson-Kessel, utilisent respectivement deux formes différentes pour calculer les distances, les résultats de segmentations sont similaires (Tamim et al., 2014a) (Fig. 3.13).

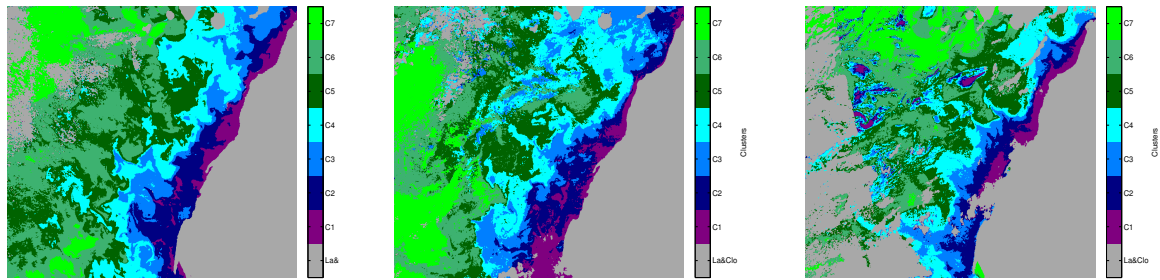


FIGURE 3.13 – Segmentation en 7 classes sur l’espace de luminance en utilisant l’algorithme de classification floue Gustafson-Kessel sur les images de la Fig. 3.1.

Toutes les méthodes de classification non-supervisée décrites dans ce chapitre dépendent fortement du nombre de classes. Il est donc primordial de choisir le nombre optimal de classes afin d’avoir une bonne qualité de classification. Ceci n’est pas toujours évident, en particulier, dans le cas de chevauchement entre les clusters, ce qui se produit souvent dans les images de la TSM présentant une dynamique très faible.

3.2.3.5 Détermination du nombre optimal de classes ou ‘cluster validity’

La classification vise à identifier des clusters avec des pixels similaires, permettant ainsi de découvrir la distribution des structures et les principales corrélations entre les pixels de l’image. Toutefois, la plupart des algorithmes de clustering ont besoin de savoir le nombre optimal de clusters dans l’image. Dans les méthodes de classification automatique, l’utilisateur ne dispose d’aucune information a priori sur le nombre de classes. Par conséquent, l’utilisation d’un nombre de classe quelconque peut conduire à une sur-estimation ou sous-estimation du nombre réel de classes dans l’image. En effet, si ce nombre est supérieur à l’optimal, alors plusieurs classes homogènes vont être brisées, conduisant ainsi à une sur-segmentation de l’image, en revanche si le nombre de classe est faibles alors plusieurs classes vont être fusionnées, et on parle alors d’une sous-segmentation.

La détermination du nombre optimal de clusters ou communément appelé ‘cluster validity’ est la technique utilisée pour savoir si une partition obtenue par une méthode de classification quelconque correspond réellement aux structures observées dans l’image. L’objectif du cluster validity est la recherche des groupes homogènes au sein d’une image où le nombre de groupes est inconnu. Le problème de recherche du nombre optimal de clusters a fait l’objet de plusieurs travaux de recherche (Davies and Bouldin, 1979a; Hartigan, 1975; Höppner et al., 1999; Jain et al., 1999). En effet, pour une même image on peut obtenir des résultats différents selon le nombre de classes c fixé par l’utilisateur. Les deux critères généralement adoptés pour l’évaluation et la recherche du nombre optimal de classes sont :

(1) *La compacité* : Mesure la proximité des éléments des clusters en utilisant la variance ; une faible valeur de variance est un indicateur de proximité.

(2) *La séparation* : Mesure le degré de différence entre deux clusters en utilisant une distance ; cette mesure a été largement utilisée en raison de sa performance et son efficacité de calcul pour les clusters de formes hyper-sphériques.

En utilisant ces critères, on peut distinguer deux approches principales pour la détermination du

nombre exact de clusters dans les images :

- *Approche par fusion de clusters* : en partant d'un nombre assez large de clusters, l'algorithme essaye de réduire ce nombre par une fusion des clusters qui représentent un certain degré de similarité.
- *Approche par indice de validation* : classification de l'image pour différentes valeurs de $c = \{2, 3, \dots, c_{max}\}$, et définir par la suite des fonctions de validation permettant d'évaluer quantitativement la qualité des partitions obtenues.

Dans ces 2 approches la détermination de la valeur maximale c_{max} doit être estimée au préalable. En effet, une étude expérimentale sur notre base de données d'images a montré que la variation de la température moyenne des clusters principaux n'est pas significative au-delà de 7 classes.

L'algorithme de détermination du nombre de classes par l'approche fusion, tente à identifier les paires de clusters qui peuvent être fusionnées à partir de notre classification initiale ($c_{max} = 7$). Une fois que ces groupes sont combinés en une seule classe, l'algorithme continue avec la sélection d'une autre paires de clusters susceptibles d'être fusionnés. Les clusters résultants du processus de fusion, doivent représenter adéquatement la distribution et les objets désirés dans l'image originale (Tamim et al., 2014b). La Fig. 3.14 montre les résultats de l'application du processus de fusion de clusters sur les images originales de la TSM de la Fig. 3.1.

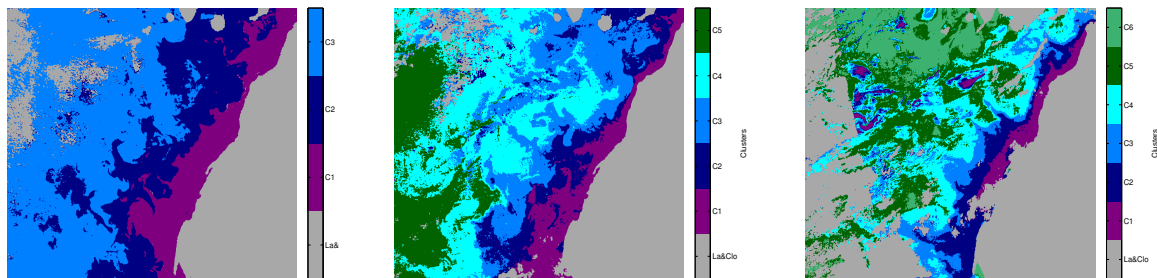


FIGURE 3.14 – Détection automatique du nombre de classes par l'application du processus de fusion entre les clusters. **De gauche à droite** : les clusters optimaux trouvés pour les images de la Fig. 3.1 sont respectivement 3, 5 et 6.

La deuxième approche repose sur le calcul des indices de validation pour la détermination du nombre exacte de clusters. En effet, plusieurs indices de validation sont proposés dans la littérature (Xu and Brereton, 2005; Wu and Yang, 2005). Leurs objectifs communs sont de trouver la classification traduisant des clusters avec des pixels homogènes. Les premiers indices apparus sont le coefficient et l'entropie de partition (V_{PC} et V_{PE}) (Bezdek, 1981) ; ces 2 indices sont très sensibles au bruit et à la variation de l'exposant de fuzzification m . D'autres indices ont été proposés (V_{FS} et V_{XB}) (Fukuyama et al., 1989; Xie and Beni, 1991) ; l'indice de V_{FS} est sensible aux valeurs élevées et faibles de m , par contre l'indice V_{XB} donne de bonnes réponses sur un large choix de clusters ($c = 2, \dots, 10$) et du coefficient de fuzzification ($1 \leq m \leq 7$). Cependant, cet indice décroît rapidement avec l'augmentation du nombre de clusters. Kwon et al. (Kwon, 1998) ont apporté une amélioration par rapport à l'indice V_{XB} . Zahid et al. (V_Z) (Zahid et al., 1999) ont introduit le concept de compacité et de séparation floue dans les indices de validation traditionnels, en considérant à la fois les propriétés géométriques des données et la matrice d'appartenance.

Tous ces indices de validation peuvent être regroupés en deux grandes catégories. La première catégorie utilise seulement les valeurs d'appartenance μ_{ik} . L'autre fait appel à la fois à la matrice de partition $\mathbf{U} = [\mu_{ik}]$ et à l'image originale elle-même.

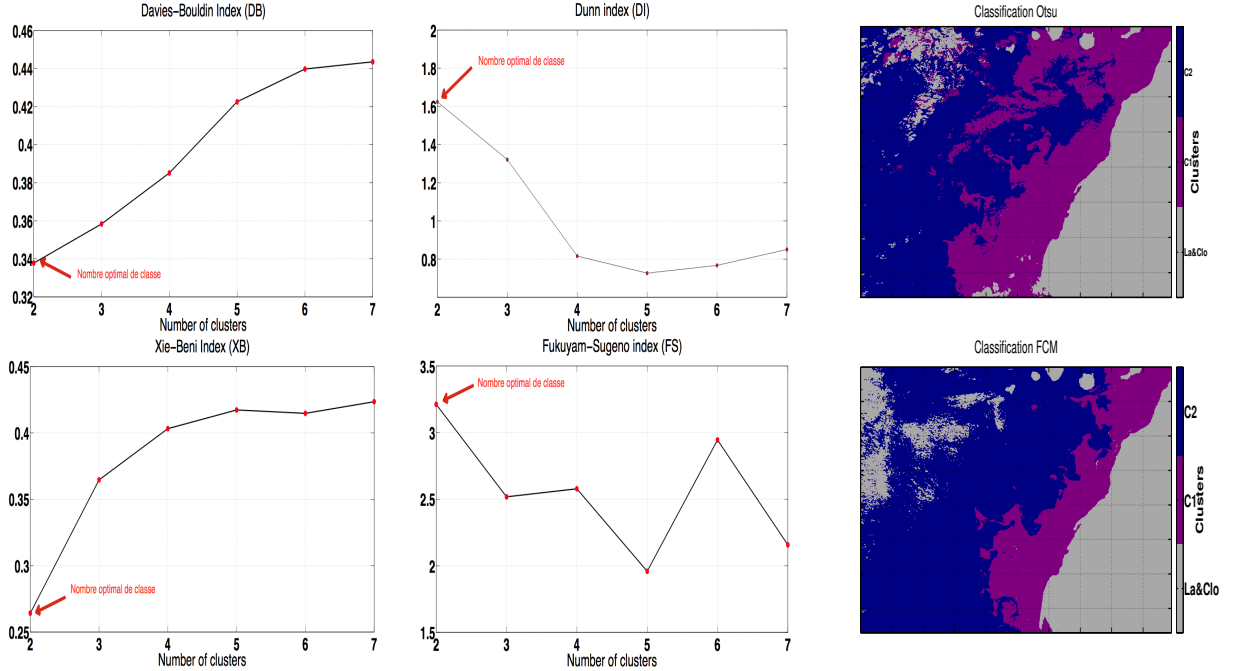


FIGURE 3.15 – Détermination du nombre optimal de classes pour les 2 premières images de la Fig. 3.1. **Première ligne** : Utilisation de la méthode d'Otsu et les indices de validation Davies-Bouldin et Dunn. **Deuxième ligne** : Utilisation de la méthode FCM et les indices de validation Xie-Beni et Fukuyama-Sugeno.

L'utilisation des indices de validation dans l'analyse des images satellitaires de la TSM a connu un grand essor notamment dans la détection du phénomène d'upwelling (Tamim et al., 2015b,a, 2014a; Sousa et al., 2008; Nascimento and Franco, 2009). Cependant, aucun indice de validation n'est parfait en soi-même (Wang and Zhang, 2007), à cet effet, nous avons utilisé et combinée dans ce travail plusieurs indices. La Fig. 3.15 montre les résultats de classification en utilisant les méthodes de partitionnement Otsu et FCM sur les 2 premières images de la Fig. 3.1. Le nombre de classes, dans chaque image, a été choisi en utilisant 2 indices de validation : pour la classification en utilisant la méthode de partitionnement dure, Otsu, on a utilisé respectivement les indices Davies-Bouldin (V_{DB}) (Davies and Bouldin, 1979b) et Dunn (V_{DI}) (Dunn, 1973). Pour la classification floue, FCM, on a utilisé les indices Xie-Beni (V_{XB}) (Xie and Beni, 1991) et Fukuyama-Sugeno (V_{FS}) (Fukuyama et al., 1989).

Le processus général pour le calcul des indices de validation des clusters et la détermination du nombre exact de classes dans une image est résumé par les étapes suivantes :

- **Etape 1** : Choisir une méthode de classification automatique (dure ou floue)
- **Etape 2** : Initialiser les paramètres de la méthode de classification, excepté le nombre de clusters c .
- **Etape 3** : Appliquer l'algorithme de classification pour différentes valeurs de c , avec $c = 2, 3, \dots, c_{max}$. (c_{max} est fixé par l'utilisateur).

- **Etape 4** : Calculer les indices de validation pour chaque partition obtenue à l'étape 3.
- **Etape 5** : Choisir le nombre optimal c^* de clusters.

Le choix de la valeur optimal des clusters, c^* , en utilisant les indices de validations V_{DB} , V_{DI} , V_{XB} et V_{FS} dans la Fig. 3.15 a été sélectionné respectivement en résolvant les équations $\min_{2 \leq c \leq c_{max}} V_{DB}$, $\max_{2 \leq c \leq c_{max}} V_{DI}$, $\min_{2 \leq c \leq c_{max}} V_{XB}$ et $\max_{2 \leq c \leq c_{max}} V_{FS}$. Les flèches en rouge dans la Fig. 3.15 illustrent la position du nombre exacte de clusters selon les maxima ou les minima globaux des courbes.

Les méthodes utilisées pour la classification des images de TSM consistent à générer des images labélisées (ou images étiquetées), ce qui ne permet pas de détecter de façon précise la zone (ou les zones) d'upwelling. Dans ce sens, la détermination exacte des zones d'upwelling est leurs séparations par rapport aux eaux chaudes du large et d'un intérêt majeur.

3.2.3.6 Combinaison des méthodes de classification pour la segmentation des régions d'upwelling

Malgré la pertinence des méthodes de classification automatique dans la classification des images de la TSM, plusieurs limitations se posent sur la façon d'interpréter les résultats obtenus. La question qui se pose essentiellement : comment peut on segmenter ou extraire les zones d'upwelling à partir des images étiquetées ? (Fig. 3.14 et Fig. 3.15). Pour cela, il convient de combiner plusieurs méthodes de classification afin d'extraire les structures d'intérêt dans les images. Dans notre travail (Tamim et al., 2015b), nous avons été intéressés par la segmentation grossière de l'upwelling dans les images de la TSM. L'algorithme commence par une classification des images en utilisant la méthode d'Otsu avec une détermination automatique du nombre de classes par les indices de validation, suivis par une détection de la région d'upwelling à partir de l'image labélisée par l'exploitation des connaissances à priori sur le phénomène d'upwelling. En effet, la région (ou étiquette) avec une valeur de température moyenne très faible est considérée comme une région d'upwelling, basé sur le fait que les eaux d'upwelling sont généralement localisées près de la côte et qu'ils sont caractérisées par des faibles valeurs de température. En revanche, les eaux chaudes du large sont caractérisées par des températures élevées. A cet effet, une méthode de seuillage simple permet de détecter la zone d'upwelling (Fig. 3.16).

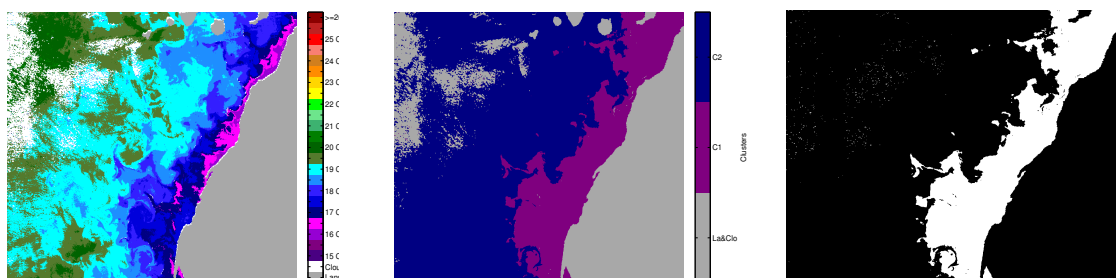


FIGURE 3.16 – Détection automatique de la zone d'upwelling. **De gauche à droite** : image TSM ; classification sur 2 classes en utilisant la méthode d'Otsu ; seuillage binaire pour la détermination de la zone d'upwelling.

Comme on peut le remarquer sur le résultat du seuillage binaire dans la Fig. 3.16, la zone d'upwelling (en blanc) est bien identifiée et séparée des eaux du large (en noir). Par ailleurs, l'image binaire de la Fig. 3.16 comporte les structures d'upwelling près de la côte et des structures étrange au phénomène d'upwelling correspondant à des faibles valeurs de températures. Ces structures sont généralement associées à des structures fines ou à des zones d'upwelling du large qui ne nous intéresse pas dans cette étude. Pour éliminer ces structures, il existe plusieurs méthodes, Tamim et al. (Tamim et al., 2015b) proposent d'utiliser la méthode d'accroissement de région (Chang and Li, 1994) afin de séparer les aires d'upwelling près de la côte et les eaux chaudes du large. L'application de la méthode d'accroissement de région ainsi que sa délimitation automatique sur l'image originale est illustrée dans la Fig. 3.17.



FIGURE 3.17 – Extraction de la zone d'upwelling par l'application de la méthode d'accroissement de région. **De gauche à droite** : image TSM, extraction de la zone d'upwelling et élimination des structures fines du large, délimitation automatique de la zone d'upwelling.

Afin de valider les résultats obtenus par notre système complet de segmentation (en utilisant la méthode d'Otsu, les indices de validation et la méthode d'accroissement de région), nous avons définis quatre grades : "Bad", "Poor", "Good" et "Excellent". "Bad" est assigné à l'image lorsque la région d'upwelling n'est pas bien détectée par l'algorithme de segmentation. Le grade "Excellent" est attribué lorsque l'air d'upwelling est très bien identifié. Ces grades sont affectés aux images par un expert océanographe. Dans cette phase de validation nous avons utilisé 70 images des années 2007 et 2008.

À partir des résultats qualitatifs montrés dans la Fig. 3.18, 44% et 48% des images obtenues lors de notre segmentation ont respectivement les notes "Excellent" et "Good". De plus, les résultats montrent que la note "Bad" n'est attribuée à aucune image. Pour la totalité des images TSM analysées dans cette phase (70 images), 92% des images ont les notes "Excellent" et "Good". Ces résultats montrent que l'approche proposée en utilisant la méthode d'Otsu délimite correctement la zone d'upwelling, et fournit un résultat de segmentation précis pour la majorité des images utilisées dans cette étude.

3.3 Analyse des résultats et discussion

Il ressort de cette étude plusieurs remarques. Tout d'abord, concernant les propriétés des images de la TSM. La classification automatique, qui permet de détecter les zones homogènes,

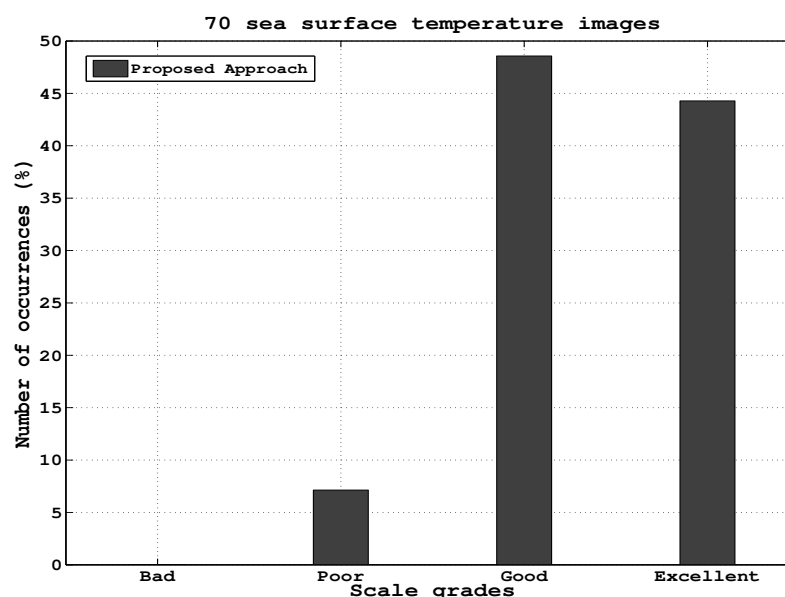


FIGURE 3.18 – Evaluation qualitative, faite par un océanographe, de la méthode de segmentation Otsu en utilisant 70 images de la TSM.

mettent notamment en évidence la faible dynamique des images. Du point de vue méthodologique, on est confronté aux limitations du choix des méthodes de classification adaptées à notre problème de détection. Un algorithme de classification automatique nécessite la définition et la sélection des différents paramètres à fixer avant l'analyse (*ex.* choix de l'approche de détermination du nombre de clusters). Cela exige en fait la connaissance préalable sur les structures et les formes d'upwelling pour effectuer ces choix.

Il ressort également que les méthodes de classification automatique utilisées dans cette étude permettent de détecter d'une manière grossière les aires d'upwelling. Cette détection englobe généralement les eaux récentes d'upwelling, froides et proches de la côte, et inclus également les zones de filaments qui pénètrent dans le large et s'étendent sur des centaines de kilomètres. Cependant, dans l'analyse et la description du phénomène d'upwelling, il est plus facile et généralement plus informatif de détecter les frontières des structures des surfaces thermiques que la zone d'upwelling elle-même (Bakun, 2006; Nieto et al., 2012).

3.4 Conclusion

Le nombre important d'algorithmes développés pour la détection des structures thermiques et des zones d'upwelling, reflète les caractéristiques des images satellitaires et particulièrement la nature turbulente et chaotique du phénomène d'upwelling. Nous pouvons faire les remarques suivantes :

- Le rapport signal-bruit des capteurs satellitaires et la couverture nuageuse dans les images de TSM, empêchant toute mesure sur les pixels de la mer,
- Les images de TSM présentent des contours très irréguliers,

— La dynamique des régions d’upwelling est très faible dans les images la TSM,

Les différents résultats obtenus avec les méthodes évoquées dans ce chapitre laissent entrevoir les limitations des techniques classiques de traitement d’image et de vision par ordinateur pour l’analyse des images de la TSM. Elles s’avèrent limitées pour l’extraction des zones d’intérêt telles que les structures thermiques de l’océan. En effet, les images naturelles possèdent des structures chaotiques caractérisant la nature et le processus extrêmement complexe mis en jeu dans l’océan. La turbulence et l’intermittence sont des sujets majeurs permettant la caractérisation et l’analyse des structures thermiques dans les images de la TSM.

FORMALISME MULTIFRACTAL POUR L'ANALYSE ET LA DETECTION DES STRUCTURES OCEANQUES À MÉSO-ÉCHELLES

Dans ce chapitre, nous utilisons une méthode radicalement nouvelle connue sous le nom du Formalisme Multiéchelles Microcanonique (FMM), pour la caractérisation et l'analyse des images naturelles. L'objectif de ce formalisme est d'exploiter les variations et les transitions les plus singulières dans ces images afin de détecter et d'analyser avec précision les différentes structures observées (Yahia et al., 2010). Dans la suite, nous décrivons brièvement les concepts de base du FMM, ses particularités et sa puissance. Outre de nombreuses applications pour le traitement des images satellitaires, ce formalisme paraît plus particulièrement adapté à l'analyse des images océanographiques. En effet, ce nouveau formalisme s'avère être un outil important et remarquable pour la modélisation et l'analyse des hiérarchies multiéchelles dans les systèmes complexes et turbulents.

4.1 Intérêt du formalisme multifractal dans l'étude et l'analyse des images de la TSM

La révolution dans les systèmes d'observation satellitaires a permis un suivi à distance des processus océaniques. En effet, la télédétection a dévoilé le caractère complexe des images de température de surface de la mer, contenant des structures aussi variées que les tourbillons avec des différentes tailles et des structures de filaments semblables à ce que la théorie prédit. L'application des méthodes standards de traitement d'image et de vision par ordinateur pour la détection de ces structures a fait l'objet de plusieurs études (voir le chapitre 3). La principale limitation rencontrée dans ces méthodes de détection est le fait qu'elles ont été construits pour une utilisation autre que l'analyse des images océanographiques, et par conséquent, elles s'avèrent être limitées pour la détection des structures océaniques dans les images de température de surface de la mer (Cayula and Cornillon, 1992).

Les méthodes classiques utilisées en traitement d'image s'appuient généralement sur des hypothèses souvent très simples par rapport à la physique des phénomènes rencontrés. En particulier, les images de TSM représentent une mesure de la variable thermodynamique (température), dans une couche superficielle mince d'un écoulement en turbulence (surface de l'océan). L'existence de la turbulence océanique implique la formation de structures extrêmement complexes, qui sont très difficiles à appréhender par les techniques classiques (linéaire) de traitement d'image, principalement en raison de l'absence de la localisation de la transformée de Fourier. En fait, l'intermittence et l'existence d'une hiérarchie multiéchelles dans les images de température de surface de la mer font de la région d'upwelling un système complexe nécessitant un

traitement non-linéaire de ce caractère turbulent. Cette étude représente une partie d'un travail énorme visant à tester la faisabilité et la pertinence du formalisme multiéchelle microcanonique dans la détection des structures d'upwelling sur la côte atlantique marocaine. En particulier, nous montrons que les pixels de contours calculés dans le cadre de ce formalisme fournissent des résultats pertinents dans le cas de données océanographiques.

Le formalisme multiéchelles microcanonique (FMM) repose sur des concepts et principes provenant de la physique statistique ; il a été principalement introduit pour la description de la notion de transition dans les signaux complexes, et aussi dans l'étude des systèmes désordonnés. En effet, il a été démontré que la complexité dans les systèmes désordonnés est intrinsèquement liée à l'existence d'une hiérarchie multiéchelle à l'intérieur de ces systèmes. Un modèle concret de cette organisation est le modèle des cascades d'énergie dans le cas d'une turbulence complètement développée (TCD). Les images naturelles, qui présentent des objets non artificiels acquises avec des conditions de luminance naturelles, possèdent une structure multifractale, il apparaît donc naturel d'adopter une approche qui reproduise les propriétés de ces images.

Dans ce contexte, la FMM représente une extension du formalisme canonique classique (Davies and Bouldin, 1979a; Frisch, 1995), permettant ainsi de combiner à la fois de l'information statistique (extraite du formalisme canonique) et de l'information géométrique (extraite du la FMM) afin d'interpréter de manière précise les différentes structures analysées dans les images naturelles. Ce nouveau formalisme s'avère être un outil important et remarquable pour la modélisation et l'analyse des hiérarchies multiéchelles dans les systèmes complexes et turbulents.

4.2 Exposants de singularité pour la détection des fronts thermiques

Les transitions des valeurs de niveaux de gris au sein des images naturelles, sont liées à l'existence d'une hiérarchie de structures multiéchelles caractérisant la TCD (Frisch, 1995). En effet, les singularités dans les images de la TSM correspondent à des ensembles de pixels avec de fortes variations dans les valeurs d'intensités, caractérisant la structure multiéchelle (Turiel et al., 2008; Yelekci et al., 2014; Pont et al., 2011). Dans ce sens, le formalisme multiéchelle microcanonique, qui se base sur le calcul de l'intensité de variations autour d'un pixel donné, est utilisé pour une description précise des fronts d'upwelling dans les images de la TSM.

En effet, pour une image de la TSM définie par son intensité $I(\vec{x})$ et sa norme de gradient $\|\nabla I\|(\vec{x})$ pour chaque pixel \vec{x} , nous introduisons une mesure μ définie par sa densité qui correspond à la sommation de la norme du gradient :

$$d\mu(\vec{x}) = d\vec{x}\|\nabla I\|(\vec{x}), \quad (4.1)$$

Avec la définition (4.1), la mesure d'une boule $\mathcal{B}_r(\vec{x})$ de rayon r centrée autour d'un pixel \vec{x} est donnée par :

$$\mu(\mathcal{B}_r(\vec{x})) = \int_{\mathcal{B}_r(\vec{x})} \|\nabla I\|(\vec{x}) d\vec{x}, \quad (4.2)$$

Notons par ailleurs qu'on travaille avec une image normalisée :

$$I(\vec{x}) = I(\vec{x}) - I_0 \quad , \quad I_0 = \int_{\Omega} I(\vec{x}) d\vec{x} \quad (4.3)$$

Ω représente le domaine d'image de telle sorte que la fonction d'intensité résultante $I(\vec{x})$ ainsi obtenue est de moyenne nulle.

La mesure μ définie ci-dessus est dite multifractale, si la mesure $\mu(\mathcal{B}_r(\vec{x}))$ de la boule $\mathcal{B}_r(\vec{x})$ évolue comme une puissance de r à un exposant de caractéristique $h(\vec{x})$, ne dépendant que de \vec{x} , lorsque r tend vers 0 (Turiel et al., 2008) :

$$\mu(\mathcal{B}_r(\vec{x})) = \alpha(\vec{x})r^{d+h(\vec{x})} + O(r^{d+h(\vec{x})}) \quad , \quad (r \rightarrow 0) \quad (4.4)$$

où d indique la dimension de l'espace ($d = 2$ pour le cas des images), et le coefficient $\alpha(\vec{x})$ ne dépend pas de l'échelle r . L'exposant $h(\vec{x})$ défini dans l'équation (4.4) est l'exposant de singularité au pixel \vec{x} ; il quantifie la force de l'image TSM au pixel \vec{x} d'une manière statistique à travers les échelles.

La principale préoccupation de la FMM est la détermination correcte, avec une haute précision, des exposants de singularité $h(\vec{x})$. Dans ce contexte, une approche présentée dans (Turiel, 2008; Pont et al., 2013; Maji and Yahia, 2014; Yahia et al., 2010) fournit un calcul numériquement stable des exposants de singularités, basé sur la projection ondelette de la mesure :

$$h(\vec{x}) = \frac{\log(\tau_\psi \mu(\text{vec}x, r_0)) / \langle \tau_\psi \mu(\cdot, r_0) \rangle}{\log r_0} + O\left(\frac{1}{\log r_0}\right) \quad (4.5)$$

où $\tau_\psi \mu(\vec{x}, r_0)$ est une projection de la mesure μ évaluée sur le pixel \vec{x} et à l'échelle r_0 avec l'ondelette ψ . $\tau_\psi \mu(\cdot, r_0)$ est la valeur moyenne de la projection en ondelette sur l'ensemble d'image, avec r_0 choisi afin de réduire l'amplitude du terme de correction $O(\frac{1}{\log r_0})$. L'échelle r_0 est choisie de telle sorte que l'image discrétisée de taille $N \times M$ correspond à la taille 1 avec $r_0 = \frac{1}{N \times M}$.

4.3 Extraction de la variété la plus singulière

Il est à noter que l'ensemble des pixels ayant de fortes transitions par rapport aux voisins, i.e. des valeurs faibles des exposants de singularité, forment un ensemble appelé MSM (Most Singular Manifold), qui maximise l'information statistique contenue dans le signal (Maji et al., 2013; Pont et al., 2013). Cet ensemble est, dans le cadre du FMM et dans la suite de ce document, associé à une densité qui représente le pourcentage de points de la MSM par rapport au nombre total de pixels de l'image. Ainsi par exemple une MSM à densité 35% signifie que l'on a calculé une MSM qui contient 35% des points de l'image d'origine. Une inspection visuelle des pixels détectés par la MSM dans les images naturelles révèle la présence des contours en ces points. Ainsi, les exposants de singularité et la MSM permettent la détermination de fronts de transitions complexes. Notons que la MSM contient les pixels de contour qui nous intéressent, car les transitions les plus fortes d'un signal contiennent le plus d'information géométrique (Maji and Yahia, 2014). La Fig. 4.1 montre l'ensemble des pixels MSM, correspondant aux faibles valeurs des exposants de singularités, calculées sur l'image originale de la TSM de la Fig. 3.1 avec une densité de 35% (Tamim et al., 2015c). Les résultats de la Fig. 3.1 montrent que les points de la MSM détectés à partir des images de la TSM correspondants parfaitement aux pixels des fronts thermiques.

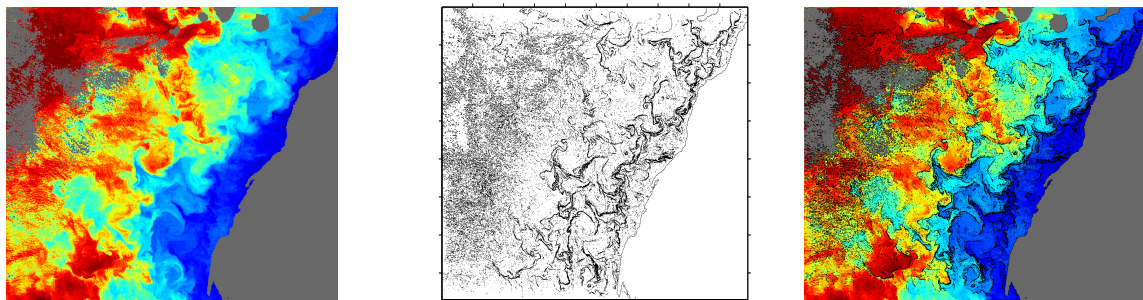


FIGURE 4.1 – Situation du 2007-01-02, (Fig. 3.1). Extraction des ensembles les plus singuliers. **De gauche à droite** : images TSM originales ; MSM extraites à une densité autour de $d_\infty = 35\%$; superposition de l'image de MSM sur l'image originale.

4.4 Extraction des fronts thermiques

La présence des nuages dans l'image originale (pixels avec la couleur grise dans le côté gauche de la Fig. 4.1), peut avoir des effets indésirables sur la détection des pixels des fronts thermiques dans les images de TSM. En effet, les points de la MSM détectés dans la Fig. 4.1 comprennent les pixels des fronts thermiques séparant 2 masses d'eaux de températures différentes et comprennent aussi des pixels des nuages séparant des masses d'eaux et celles des nuages.

Afin de ne pas considérer les limites frontales entre les nuages et les masses d'eaux comme des fronts d'upwelling, nous avons utilisé un masque de nuage cité dans (Stowe et al., 1999), de telle sorte que pour chaque pixel de la MSM (Fig. 4.1), si les 8 pixels voisins contiennent au moins un pixel nuageux, le pixel MSM en question est ignoré. La Fig. 4.2 montre l'image MSM de la Fig. 4.1 après avoir enlevé tous les pixels des MSM adjacents aux nuages (Tamim et al., 2015c). Le résultat montre que les pixels de la MSM détectés aux voisinages des nuages ont été supprimé et par conséquent, ces pixels ne sont pas pris en compte dans le résultat final de la détection.

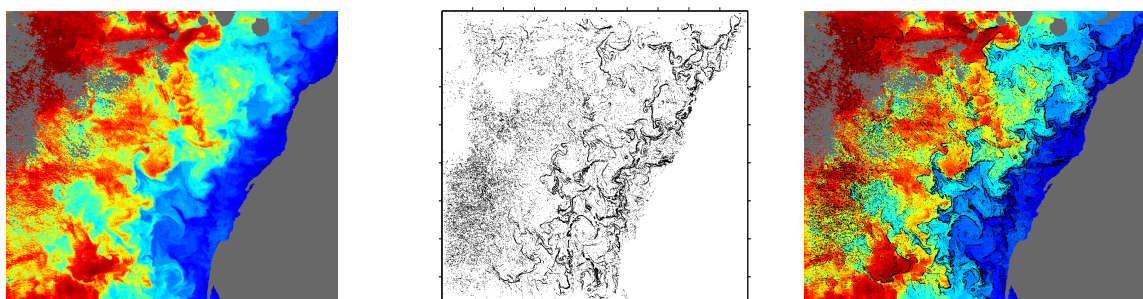


FIGURE 4.2 – Situation du 2007-01-02 (Fig. 3.1). Extraction des ensembles les plus singuliers. **De gauche à droite** : images TSM originales ; MSM extraites à une densité autour de $d_\infty = 35\%$ avec l'application du masque de nuages afin d'écarter les pixels non désirables ; superposition de l'image de MSM sur l'image originale.

En vue d'examiner chaque front dans l'image MSM de la Fig. 4.2, il est nécessaire de relier et connecter chaque pixel de la MSM pour former un seul contour. Pour cela, l'algorithme qu'on a proposé, cherche un pixel de la MSM dans l'image de la Fig. 4.2, et ce pixel ($MSM(i, j)$) représente le premier pixel du n -ième contour. L'algorithme ajoute par la suite les pixels adjacents en examinant les 8 pixels voisins. L'algorithme s'arrête lorsqu'il n'y a aucun pixel voisin à ajouter. En outre, les contours avec une longueur inférieure à 10 pixels sont considérés comme étant indésirables (Oram et al., 2008). Ces contours ne représentent pas les fronts thermiques mais plutôt des structures étrangères à celles de l'upwelling (ex. artefacts, structure fine). En conséquence, chaque contour qui ne dépasse pas une longueur minimale de 10 pixels sera supprimé. La Fig. 4.3 montre les résultats finals de la détection des fronts d'upwelling en utilisant la variété la plus singulière (MSM).

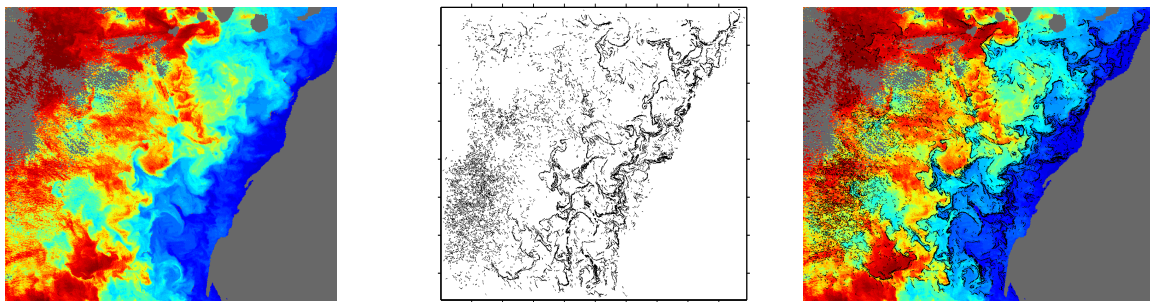


FIGURE 4.3 – Situation du 2007-01-02 (Fig. 3.1). Extraction des ensembles les plus singuliers. **De gauche à droite** : images TSM originales ; utilisation de la MSM avec application d'un masque de nuage toute en masquant les contours avec une longueur minimale ; superposition de l'image de MSM sur l'image originale.

4.5 Analyse des résultats et discussion

Afin de valider l'algorithme de détection des structures thermiques en utilisant la MSM, en termes de sur-segmentation ou de sous-segmentation, nous avons comparé les résultats trouvés avec celles de l'algorithme proposé par Oram *et al.* (Oram et al., 2008). Ce dernier, a proposé une extension de la méthode de détection des contours Canny (Canny, 1986), en utilisant une sélection automatique des valeurs du seuillage à partir d'un histogramme cumulatif global pour chaque image. Les avantages principaux de l'algorithme utilisé dans (Oram et al., 2008) sont :

- L'utilisation d'un algorithme standard bien établi de détection de contours, qui se base particulièrement sur le gradient,
- L'algorithme de Canny est utilisé dans plusieurs articles comme un procédé de comparaison avec les nouveaux algorithmes développés dans la détection des structures thermiques (Nieto et al., 2012).

La Fig. 4.4 montre les résultats de l'application de l'algorithme de Oram et al. sur l'image originale de la Fig. 4.3. Les fronts détectés sont superposés sur l'image originale.

Tout au long de cette évaluation, nous avons utilisé cinq échelles : "Bad", "Poor", "Acceptable", "Good" et "Excellent". "Bad" est attribué à l'image lorsque les fronts d'upwelling sont

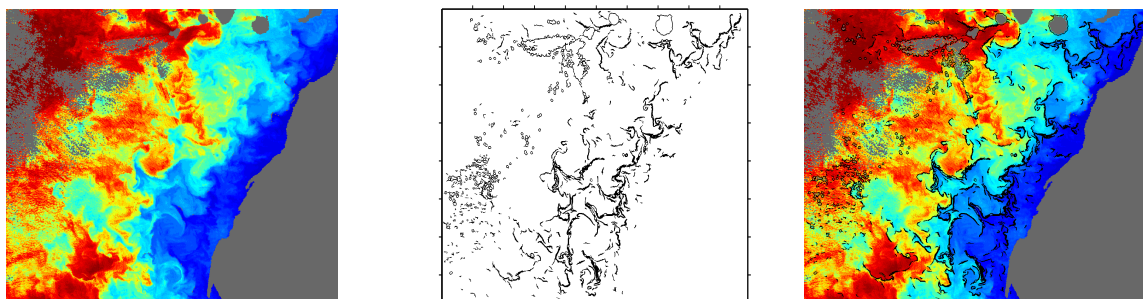


FIGURE 4.4 – Situation du 2007-01-02 (Fig. 3.1). Extraction de la variété la plus singulière. **De gauche à droite** : images TSM originales ; utilisation de la MSM avec application d'un masque de nuage toute en masquant les contours avec une longueur minimale.

mal détectés par l'algorithme de la MSM ou l'algorithme de Oram et al. (Oram et al., 2008). Le grade "Excellent" est attribué lorsque tous les fronts thermiques sont très bien identifiés. Dans cette étude de validation, nous avons utilisé 92 images sélectionnées à partir de notre base de donnée générale afin de couvrir chaque semaine des années 2006 et 2007.

À partir des résultats de l'évaluation présentés dans la Fig. 4.5, nous pouvons conclure que la méthode utilisant la MSM donne de meilleurs résultats comparant à celle trouvés par l'algorithme de Oram et al. (Oram et al., 2008), qui repose sur une détection des contours en se basant sur l'approche gradient avec une sélection automatique des seuils. En effet, pour le grade "Bad", la méthode de détection par MSM a obtenus la valeur 2% tandis que pour la méthode d'Oram et al. la valeur 9% est atteinte. Pour le grade "Good" la valeur de 48% est atteinte en utilisant la méthode de MSM et 40% en utilisant la méthode d'Oram et al.. En générale, les valeurs de 54% et 42% sont atteintes par les grades "Good" et "Excellent" pour respectivement les méthodes MSM et Oram et al..

Après l'évaluation des 2 méthodes de détection des fronts thermiques sur les 92 images de TSM le long de la côte atlantique marocaine, nous pouvons conclure que l'algorithme de MSM fournis des résultats satisfaisants comparés à la méthode d'Oram et al.. En effet, la détection par MSM détecte presque tous les fronts thermiques tout en supprimant les contours détectés dans les régions nuageux. Néanmoins, l'algorithme utilisé dans Oram et al. (Oram et al., 2008) ne détecte pas tous les fronts thermiques (Fig. 4.5) ainsi que la méthode à mal classer les régions nuageux comme des zones frontales, en particulier dans les zones près de la côte et près des îles. Plus important encore, la qualité de détection des fronts obtenus par l'algorithme de MSM indique que cette méthode peut être utilisée pour obtenir une première approximation de la localisation des fronts thermiques sur la côte atlantique marocaine.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement les fondements théoriques du formalisme multiéchelle microcanonique, avec une présentation complète de ses principales composantes (exposants de singularité et MSM) pour la caractérisation géométrique de la complexité dans les images naturelles. Ce modèle multifractal exhibe un ensemble particulier, la MSM, dont la connaissance permet de prédire la distribution de la température dans les images de la TSM ;

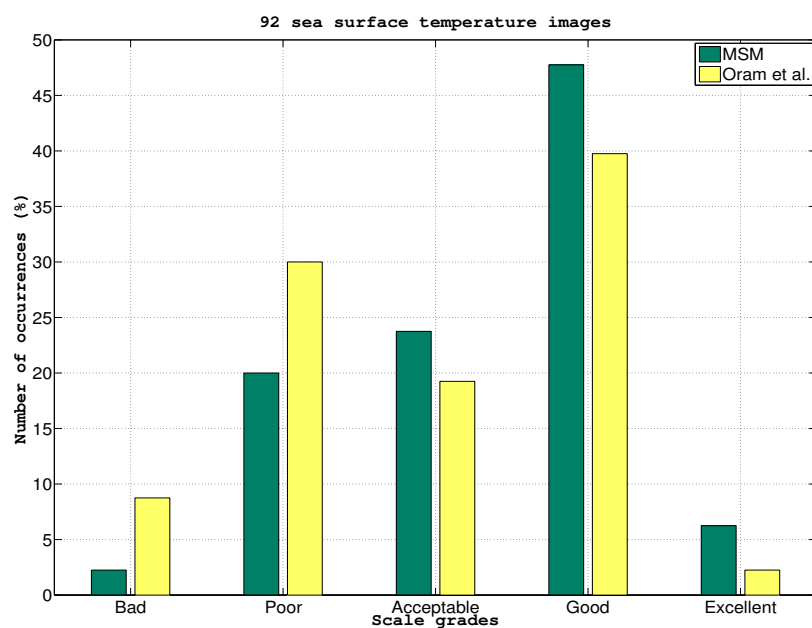


FIGURE 4.5 – Evaluation qualitative réalisée par un océanographe sur les résultats obtenus par l'application de l'algorithme de la MSM et l'algorithme de Oram et al. sur 92 images de TSM.

elle est principalement constituée de contours des objets d'intérêt dans les images et s'avère particulièrement adaptée a nos images de la TSM.

MISE EN PLACE D'UN APPLICATIF POUR LA CARACTÉRISATION ET L'ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DE L'UPWELLING MAROCAIN

Dans ce chapitre, nous décrivons un système de calcul qui fournit un cadre nécessaire pour une segmentation et une délimitation non-supervisée des zones d'upwelling sur les images de TSM le long de la côte atlantique marocaine. L'objectif est d'exploiter les informations issues de l'imagerie satellitaire afin de la mettre à la disposition des utilisateurs sous forme de produits opérationnels traduisant différents paramètres environnementaux directement exploitables, pour surveiller et évaluer la dynamique spatio-temporelle de l'upwelling marocain.

5.1 Principe et méthodes de calcul d'indice d'upwelling

La caractérisation et l'analyse de la variabilité spatiale et temporelle du phénomène d'upwelling le long de la côte atlantique marocaine revêtent une importance cruciale pour comprendre le processus de la productivité de l'écosystème marin et l'influence du phénomène d'upwelling sur les fluctuations des ressources halieutiques. En effet, l'évolution spatiale et temporelle de ces ressources est en étroite interaction avec la dynamique de leur environnement marin, notamment celle de l'upwelling.

Néanmoins, le suivi de l'évolution temporelle de la situation du phénomène d'upwelling à partir des mesures satellites est une opération fastidieuse et difficile à réaliser à partir de l'analyse systématique des images quotidiennes ou même hebdomadaires. C'est pour rendre ce suivi opérationnel et efficace que des méthodes, simples ou complexes, ont été développées pour synthétiser la situation de l'upwelling le long des côtes pour une période donnée, courte ou longue. En effet, le résultat est un produit synthétique de l'imagerie thermique qui permet d'une part de réduire la masse de données (images satellites) à analyser et interpréter et d'autre part de comprendre et de suivre la dynamique et la variation spatiale et temporelle du phénomène d'upwelling le long de la côte atlantique marocaine.

La plupart de ces méthodes préconisent l'estimation d'un indice basé généralement sur la différence thermique entre les eaux côtières et les eaux du large. En effet, la température le long d'une radiale, perpendiculaire à la côte, est sensée être plus ou moins la même aussi bien dans les eaux du large que dans les eaux côtières. Partant du principe que les températures, influencées par l'effet de la latitude, augmentent du Nord vers le Sud et présentent des isothermes plutôt horizontaux et perpendiculaires à la côte. Hors, en cas de présence de l'upwelling côtier avec des températures basses dans les eaux proches des côtes, interrompt cette homogénéisation thermique horizontale en créant des différences thermiques entre les eaux côtières et les eaux du large plus chaudes. Les isothermes prennent cette fois une allure franchement méridienne plus

ou moins parallèles à la côte. De ce fait, la différence thermique entre les eaux du large, négative en cas d'upwelling, est un très bon indicateur non seulement de la présence de l'upwelling pour chaque latitude, mais aussi de l'intensité et la force de cet upwelling matérialisé généralement par des fronts thermiques plus ou moins forts. A ce titre, plusieurs méthodes de calcul d'indice d'upwelling ont été développées et mise sous forme d'applicatif permettant de générer des données synthétiques renseignant sur la situation de l'upwelling couvrant une période donnée (Nykjea et al., 1992; Nykjea and Van Camp, 1994; Demarcq and Faure, 2000) :

- *L'indice d'Ekman*, est un classique extrait à partir de simples données des vents mesurés en mer ou le long des côtes. Partant du fait qu'un vent, avec une vitesse donnée et dans une direction donnée, exerce une contrainte sur la surface de la mer, il crée un courant de dérive en surface à droite (gauche) de sa direction dans l'hémisphère nord (sud). Ce déplacement horizontal des couches d'eaux superficielles de l'océan par l'action de vent s'appelle le transport d'Ekman et il est exprimé en million de mètres cubes par seconde (Ekman, 1905) (Fig. 5.1).

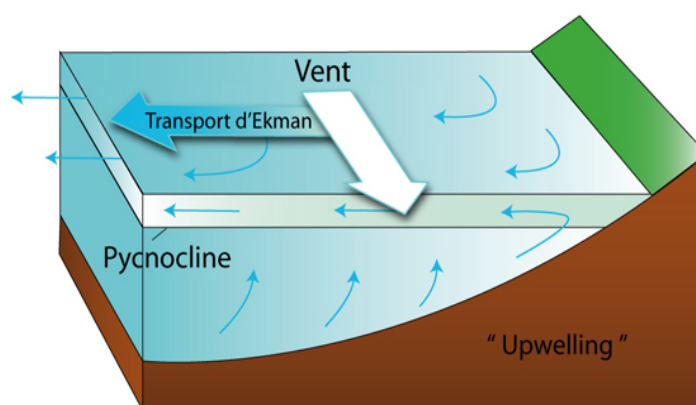


FIGURE 5.1 – Le vent soufflant parallèlement à la côte, les masses d'eau de surface sont déviées vers la droite (transport d'Ekman). Cette divergence est alimentée par la remontée d'eau de subsurface (UVED, 2006).

- *Indice d'upwelling*, basé sur la différence thermique entre les eaux littorales et les eaux du large, sur la même radiale. Cet indice est extrait exclusivement des données satellites de température de la surface de la mer (Fig. 5.2).

En littérature, il existe plusieurs indices exploitant les images de TSM pour le calcul de l'intensité de l'upwelling. Une première méthode est proposée par Nykjaer et al. (Nykjea et al., 1992) et Nykjaer et Van Camp (Nykjea and Van Camp, 1994) sur l'ensemble du littoral ouest africain qui calcule une simple différence de température entre la valeur maximale TSM_{max} (représentant les eaux chaudes du large) et la valeur minimale TSM_{min} (représentant les eaux d'upwelling) rencontrées le long de la même radiale. Les résultats de cet indice sont largement corrélables avec ceux obtenus par l'indice d'Ekman (Ekman, 1905).

$$CUI = TSM_{max} - TSM_{min} \quad (5.1)$$

Pour contourner le problème d'éventuel pixels nuageux et de valeurs de températures "artificielles", liées aux structures fines mal masquées ou au mauvais choix des références des TSM

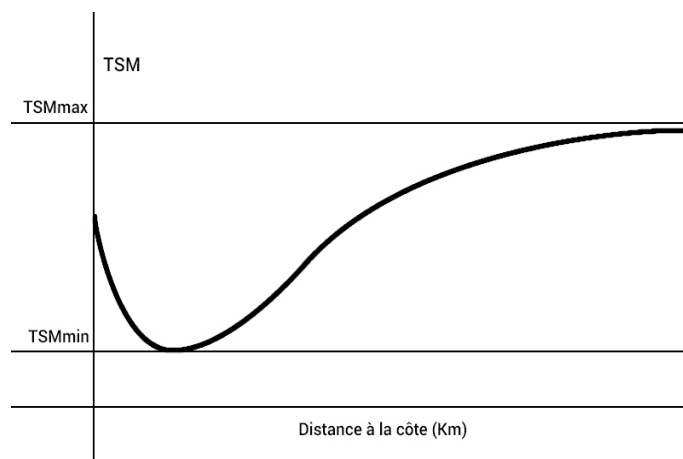


FIGURE 5.2 – Exemple de profil zonal de TSM le long d'une radiale en cas de présence d'upwelling (Atillah et al., 2005).

maximales et TSM minimales, que pourrait intégrer le calcul de l'indice d'upwelling le long de la radiale, *Demarcq et Faure* (Demarcq and Faure, 2000) ont proposée un indice basé sur une différence de température normalisée qui se réfère à des mesures de températures in-situ.

$$CUI = \frac{TSM_{max} - TSM_{min}}{TSM_{max} - TSM_{up}} \quad (5.2)$$

avec TSM_{max} et TSM_{min} , sont respectivement la température maximale et la température minimale le long d'une radiale. TSM_{up} représente la température des eaux d'upwelling mesurées par les compagnes océanographiques dans la zone étudiée et permet de s'affranchir des caractéristiques locales de la région, en incluant la valeur théorique in-situ, TSM_{up} , dans le calcul de l'indice.

Cette dernière méthode de calcul d'indice d'upwelling est reprise conjointement par le CRTS et l'INRH, dans le cadre du projet GERMA (Gestion des Ressources MARines) et a donné lieu à un applicatif et a permis de faire le suivi de la dynamique d'upwelling le long des côtes marocaines sur une vingtaine d'années (Atillah et al., 2005). C'est dans ce contexte que nous avons repris et affiner l'outil de calcul d'indice d'upwelling développé au CRTS pour caractériser la dynamique de l'upwelling. En effet, la nouvelle version de l'applicatif vient s'affranchir d'un certain nombre de lacunes et difficultés dont souffrait l'applicatif en question. Parmi ces difficultés, il y a principalement la subjectivité dans la délimitation des zones de recherche du minimum et du maximum thermiques le long de la radiale qui se basait sur des critères arbitraires tels que la distance par rapport à la côte ou le critère de profondeur. Hors, dans le nouveau applicatif, cette recherche du TSM_{min} est effectuée à l'intérieure du front thermique extrait de l'image en question.

5.2 Applicatif de calcul de l'indice d'upwelling

L'applicatif de calcul de l'indice d'upwelling s'est attaché dans un premier temps à présenter l'avantage de choisir, selon les utilisations, entre les deux principales méthodes de calcul d'upwelling : 1) la méthode de différence thermique simple entre le maximum et le minimum

thermique le long de la radiale (Nykjeer and Van Camp, 1994) équation (5.1) et, 2) la méthode normalisée pour minimiser d'éventuelles erreurs associées aux structures fines ou aux pixels nuageux mal masqués (Demarcq and Faure, 2000) équation (5.2). Néanmoins, cette dernière approche exige des données in-situ pour caractériser l'état d'un upwelling référence qui servira de normalisation du calcul de tout indice. Or, l'absence totale ou partielle des données de mesures in-situ pour établir cet état moyen rend l'utilisation de cette approche très difficile et ne reflète pas la réalité de l'upwelling qui est tributaire exclusivement de sa situation lors de la période couverte par les mesures in-situ. Ainsi, si notre applicatif reprend la même conception et les mêmes paramètres de la version GERMA, il n'en demeure pas moins, qu'il propose un certain nombre d'améliorations et d'adaptations pour résoudre les difficultés rencontrées dans l'ancienne version.

5.2.1 Configuration des radiales

Comme l'upwelling côtier est largement conditionné par la largeur du plateau continental, les radiales ont été dessinées de façons perpendiculaires à la direction générale de la côte marocaine pour mieux couvrir la largeur de ce plateau (Fig. 5.3). Les indices d'upwelling sont calculés donc sur des radiales prises dans une direction fixe par rapport à la côte. Le nombre de radiales et donc d'indices d'upwelling pour chaque image qui couvre l'ensemble du territoire marocain varie de 1573 pour une image en pleine résolution ($0.01^\circ : 1 \text{ km}$) à 320 pour une image sous échantillonnées spatialement à basse résolution ($0.05^\circ : 5 \text{ km}$).

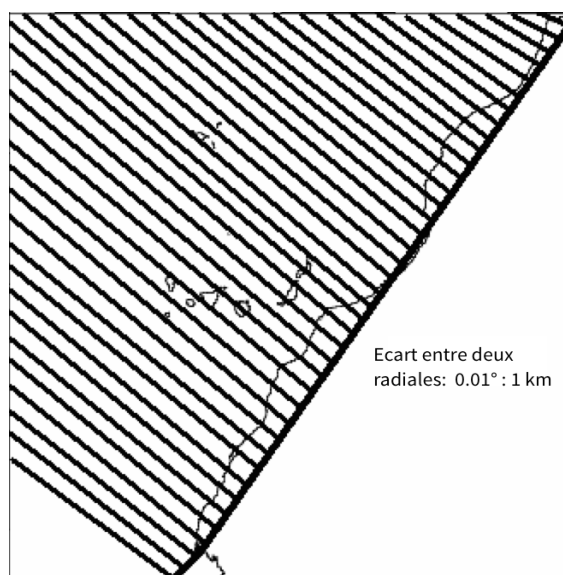


FIGURE 5.3 – Configuration oblique des radiales pour la prise en considération de l'effet du plateau continental (Atillah et al., 2005).

5.2.2 Recherche des valeurs minimales et maximales de la TSM

L'indice d'upwelling est basé sur la différence de température entre les eaux chaudes du large et les eaux froides côtières. La valeur de TSM_{min} utilisée pour le calcul de l'indice d'up-

welling est tout simplement le premier minimum rencontré lorsque l'on s'éloigne du rivage dans une direction perpendiculaire au trait de la côte, alors que la TSM_{max} est le maximum de température le long de la radiale. La définition des zones de recherche respectives pour la valeur minimale et la valeur maximale de la température le long de la radiale reposait arbitrairement sur des critères homogènes quelque soit l'endroit de calcul de l'indice le long de la côte et pour toute la série d'images à traiter. En effet, l'appliquatif proposait à l'utilisateur de fixer deux principaux critères : la distance à la côte et la profondeur (bathymétrie) pour délimiter ou restreindre la zone de recherche du TSM_{min} et du TSM_{max} .

En revanche, la nouvelle approche propose pour la recherche du TSM_{min} et du TSM_{max} , des limites frontales extraites directement de chaque image à traiter. Cela permet de s'affranchir de la réalité de la situation de l'upwelling (extension au large) qui varie énormément d'une image à l'autre, d'une saison à l'autre, d'une année à l'autre et surtout d'un endroit côtier à l'autre. En effet, avant tout calcul d'indice, l'appliquatif offre la possibilité de segmenter l'image et d'en dériver le front thermique principal qui sépare et délimite les eaux froides d'upwelling (zone de recherche du TSM minimum) et les eaux chaudes du large (zone de recherche du TSM maximum). Ainsi, la largeur de la zone de recherche de ces deux paramètres n'est plus homogène arbitrairement pour l'ensemble des radiales et images à traiter, mais dépendra de l'extension géographique de l'upwelling rencontré dans chaque image (Fig. 5.4). La Fig. 5.4

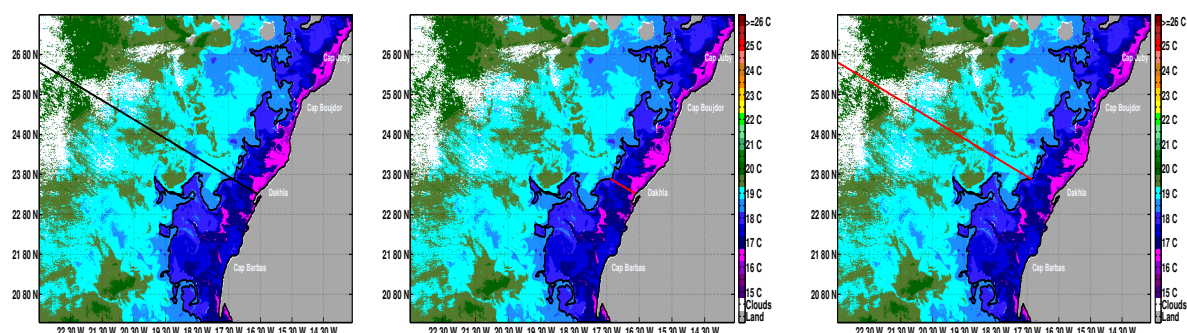


FIGURE 5.4 – Situation du 2007-01-02, (Fig. 3.1). Exemples de front thermique délimitant le champs de recherche du minimum et du maximum de température le long de chaque radiale pour la partie sud du Maroc.

montre la position du front thermique qui contrôle et délimite le domaine de recherche de la TSM minimale et maximale le long de la radiale. Néanmoins, le recours à la distance ou la profondeur pour restreindre cette recherche est toujours possible au cas où la segmentation ne permet pas de déceler un front thermique, notamment lors du faible ou d'absence d'upwelling.

5.2.3 Principaux Modules de l'appliquatif

L'appliquatif de calcul d'indice d'upwelling est développé sous le logiciel MatLab® (Matrix Laboratory) qui comporte une interface graphique simple et facile d'utilisation avec des modes d'affichage des résultats variés. Il a été testé en utilisant le système d'exploitation Mac OS X avec un processeur Intel Core i7 et une fréquence d'horloge de 2.2 GHz avec 8 Go de mémoire de RAM. L'outil inclut deux principaux modules (Fig. 5.5 et Fig. 5.6) intégrés avec

une interface graphique (GUI), permettant ainsi une interaction facile en plus d'un ensemble de fonctionnalités supplémentaires :

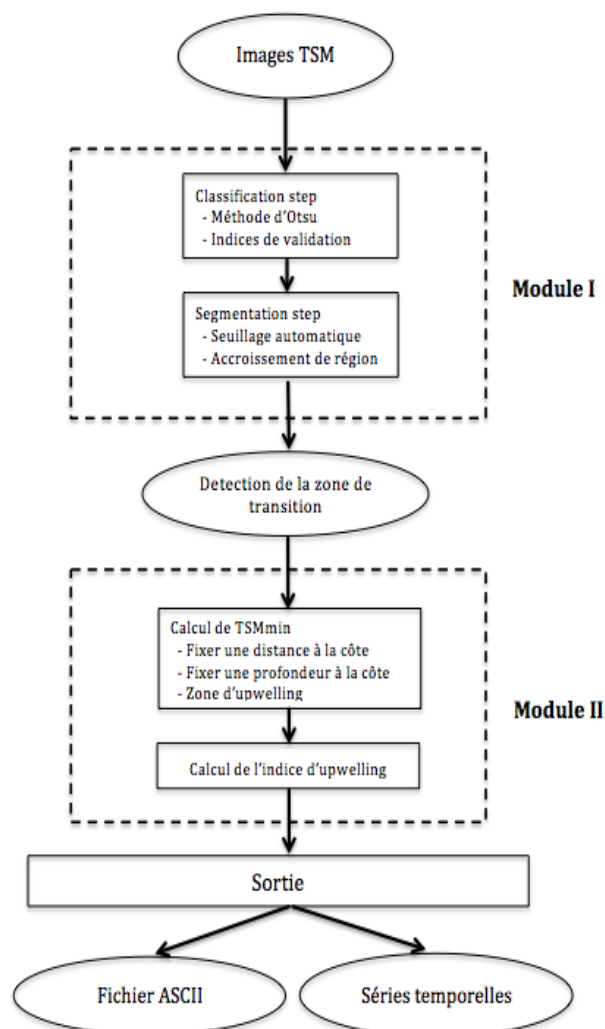


FIGURE 5.5 – Architecture de l'applcatif de calcul d'indice d'upwelling contenant deux modules : I) segmentation de l'upwelling et II) calcul de l'indice d'upwelling.

5.2.3.1 Module pour la détection de la zone occupée par les eaux d'upwelling

Ce module permet d'obtenir une première classification des zones d'upwelling, en utilisant la méthode de classification d'Otsu (Otsu, 1979) et les indices de validation Davies-Bouldin (Davies and Bouldin, 1979b) et Dunn (Dunn, 1973), suivie par une segmentation de la région d'upwelling par application de la méthode d'accroissement de région (chapitre 3). Ce module dérive le front thermique qui sera utilisé comme donnée input pour délimiter géographiquement les zones de recherche du TSM_{min} et du TSM_{max} (Fig. 5.7).

Ainsi, l'utilisateur a le choix entre le traitement d'une seule image ou une série d'images couvrant une période donnée qui serviront comme inputs principaux du module de calcul de l'indice (Fig. 5.6). Il pourra également visualiser l'image input et les résultats de segmentation

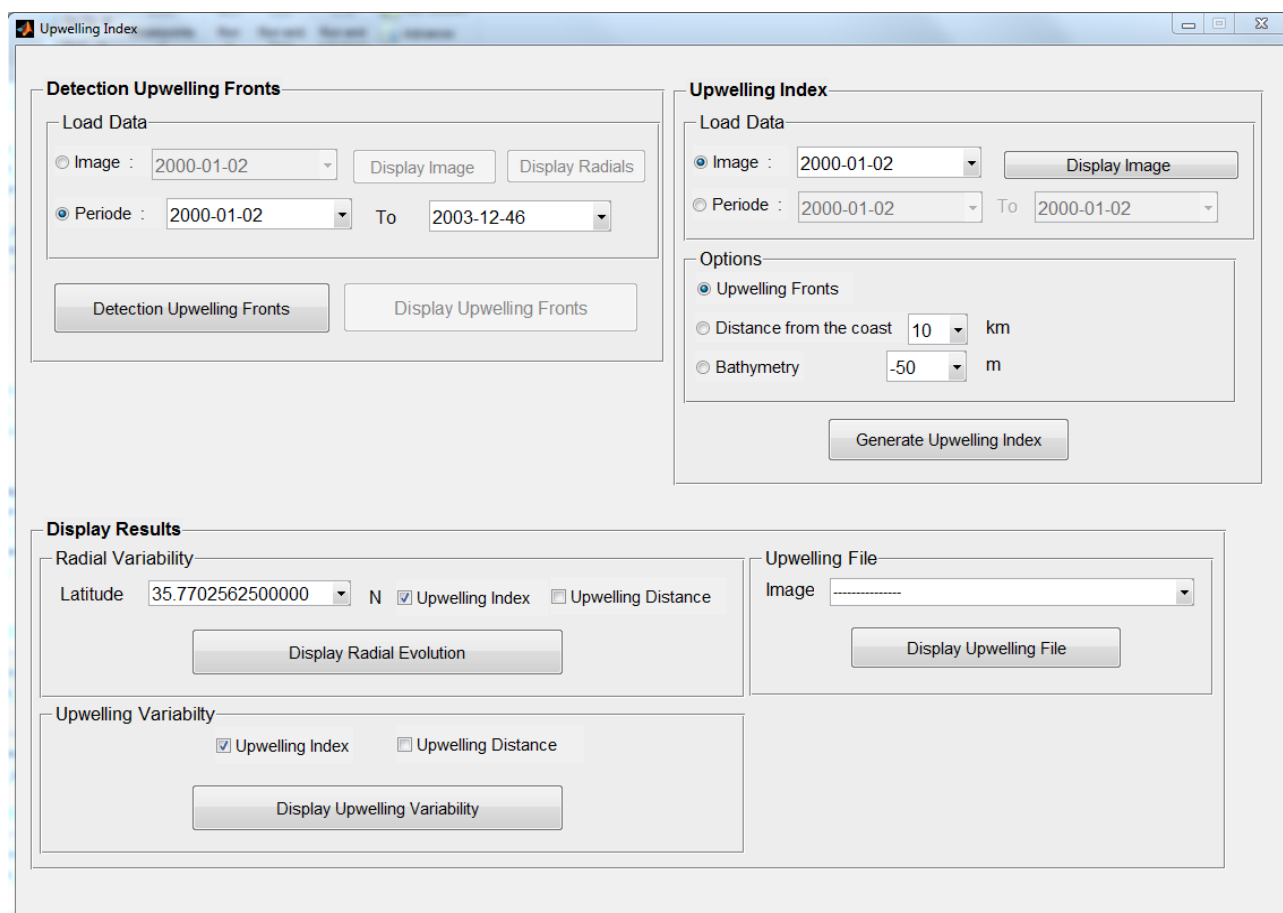


FIGURE 5.6 – Interface graphique de l’applcatif integrant le module de délimitation de l’aire d’upwelling et le module de calcul de l’indice d’upwelling.

du Module I sur des figures séparées de l’interface principale, avec une option d’enregistrement des résultats en différents formats (ex : png, jpg, eps, ...) (Fig. 5.7).

5.2.3.2 Module pour le calcul de l’indice d’upwelling

Le deuxième module est l’outil principal qui permet de calculer les indices d’upwelling le long de toutes les radiales qui couvrent le littoral atlantique. L’utilisateur peut choisir le traitement d’une image ou de plusieurs images en indiquant les dates de début et de fin de la période souhaitée. Par ailleurs, pour s’affranchir de la situation réelle de l’extension de l’upwelling, le paramètre principal utilisé pour la délimitation des zones de recherche du minimum et du maximum thermiques est le front thermique défini par le précédant modèle de l’applcatif. En effet, le minimum (TSM_{min}) doit être trouvé entre la côte et la limite du front le long d’une radiale donnée, et le maximum (TSM_{max}) au delà de ce front. Néanmoins, l’utilisateur peut recourir à d’autres critères, notamment en cas de discontinuité ou absence totale du front thermique qui se présentent notamment lorsque l’upwelling est absent ou en présence d’une faible intensité. Ces critères sont :

- La distance à la côte pour définir la largeur de l’upwelling où l’applcatif cherchera la valeur minimale de la température en fixant une distance donnée.

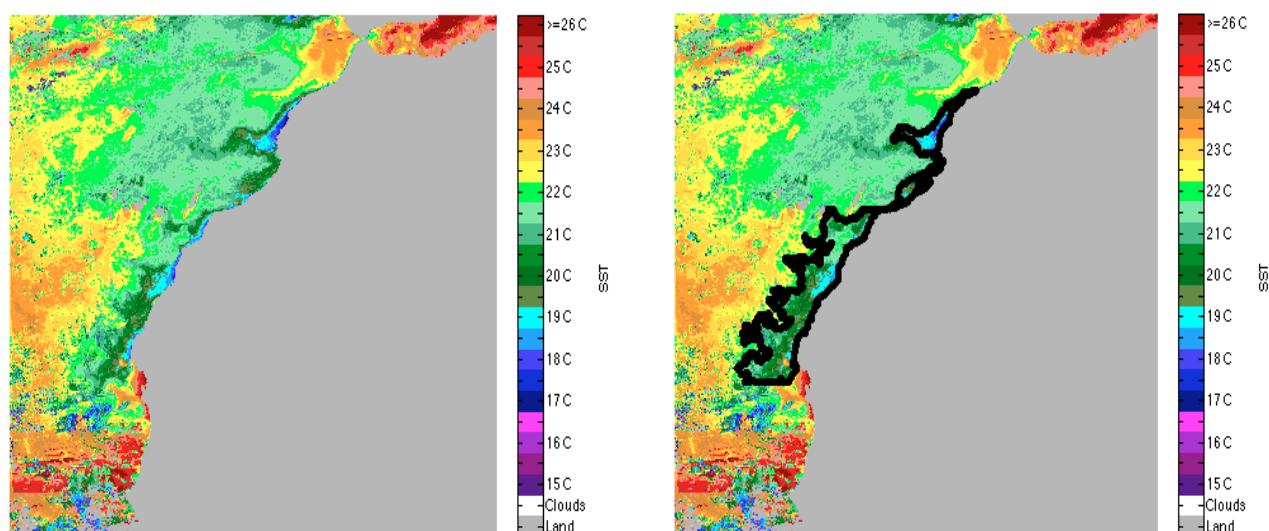


FIGURE 5.7 – Exemple de résultats de segmentation d'image TSM (module I de l'applcatif). **De gauche à droite** : images du 2007-07-26 après affichage par le bouton 'Display Image' ; Segmentation en utilisant le Module I de l'applcatif et affichage en utilisant le bouton 'Display Upwelling Fronts' (Fig. 5.6).

- La profondeur en fixant une valeur bathymétrique pour définir cette largeur en fonction de l'extension du plateau continental où il est possible de chercher ce minimum thermique.

5.2.3.3 Résultats de sorties de l'applcatif

Les sorties de cet applcatif de calcul de l'indice d'upwelling se présentent sous forme de valeurs d'indices d'upwelling pour chaque radiale et pour chaque image de la période traitée. Les résultats peuvent être sauvegardés sous deux formats principaux (Fig. 5.5) : soit sous forme d'un fichier ASCII (.xls) (Fig. 5.8), soit sous format graphique en forme de courbes représentant l'évolution spatiale et temporelle de l'upwelling le long de la côte atlantique marocaine (Fig. 5.9). Les données input de température de surface de la mer sont définies à une résolution de 8 jours (hebdomadaire) avec le format GeoTIFF.

Fichier ASCII des valeurs de l'indice

Le fichier de sortie principal de l'applcatif proposé dans cette étude est un produit d'indices d'upwelling, (format .xls) qui est destiné à être archivé et progressivement accumulé pour la constitution des séries temporelles qui seront analysées par la suite. Les caractéristiques de ce fichier de sortie sont (Fig. 5.8) :

- *Colonne 1, 2 et 3* : Indice et position géographique (Latitude et Longitude) de chaque radiale,
- *Colonne 4* : Valeur de la TSM minimale,
- *Colonne 5 et 6* : Localisation de la position géographique de la TSM minimale,
- *Colonne 7* : Largeur de la zone couverte par les eaux d'upwelling sur cette radiale
- *Colonne 8* : Valeur de la TSM maximale,

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Radial	RadialLat	RadialLon	SSTmin	SSTminLat	SSTminLon	SSTminDist	SSTmax	SSTmaxLat	SSTmaxLon	CUI
2	1	35.7702563	-5.97209792	19.68	35.7702563	-5.97209792	25	22.18	35.9308563	-6.22199375	2.5
3	2	35.7602188	-5.97209792	18.48	35.7602188	-5.97209792	19	22.18	35.9308563	-6.23198958	3.7
4	3	35.7501813	-5.97209792	17.87	35.7501813	-5.97209792	19	22.26	35.9308563	-6.24198542	4.39
5	4	35.7401438	-5.97209792	17.53	35.7401438	-5.97209792	18	22.24	35.9208188	-6.24198542	4.71
6	5	35.7301063	-5.98209375	18.47	35.7301063	-5.98209375	18	22.23	35.8907063	-6.22199375	3.76
7	6	35.7200688	-5.98209375	18.47	35.7200688	-5.98209375	19	22.25	36.0312313	-6.45189792	3.78
8	7	35.7100313	-5.99208958	18.8	35.7100313	-5.99208958	19	22.26	35.9810438	-6.41191458	3.46
9	8	35.6999938	-6.00208542	18.74	35.7100313	-6.02207708	19	22.34	36.0312313	-6.51187292	3.6
10	9	35.6899563	-5.99208958	18.74	35.7100313	-6.02207708	20	22.34	36.0312313	-6.51187292	3.6
11	10	35.6799188	-5.98209375	18.74	35.6999938	-6.01208125	20	22.34	36.0312313	-6.51187292	3.6
12	11	35.6698813	-6.00208542	18.64	35.6698813	-6.00208542	25	22.22	35.9910813	-6.49188125	3.58
13	12	35.6598438	-6.00208542	18.87	35.6598438	-6.00208542	29	22.16	35.9609688	-6.46189375	3.29
14	13	35.6498063	-6.00208542	18.89	35.6498063	-6.00208542	29	22.18	35.9710063	-6.49188125	3.29
15	14	35.6397688	-6.02207708	19.2	35.6698813	-6.06206042	28	22.18	35.9509313	-6.49188125	2.98
16	15	35.6297313	-6.00208542	19.2	35.6698813	-6.06206042	31	22.18	35.9509313	-6.49188125	2.98
17	16	35.6196938	-6.02207708	19.2	35.6498063	-6.06206042	28	22.19	35.8706313	-6.40191875	2.99
18	17	35.6096563	-6.01208125	19.2	35.6498063	-6.07205625	30	22.19	35.8706313	-6.40191875	2.99
19	18	35.5996188	-6.03207292	19.2	35.6397688	-6.09204792	38	22.18	35.8605938	-6.42191042	2.98
20	19	35.5895813	-6.03207292	19.2	35.6397688	-6.10204375	44	22.23	35.9007438	-6.51187292	3.03
21	20	35.5795438	-6.04206875	19.2	35.6297313	-6.11203958	47	22.23	35.8907063	-6.51187292	3.03
22	21	35.5695063	-6.02207708	19.08	35.5695063	-6.02207708	49	22.23	35.8907063	-6.51187292	3.15
23	22	35.5594688	-6.03207292	19.3	35.5895813	-6.08205208	51	22.27	35.8907063	-6.54186042	2.97
24	23	35.5494313	-6.03207292	19.31	35.5494313	-6.03207292	54	22.23	35.9007438	-6.57184792	2.92

FIGURE 5.8 – Exemple de sortie ASCII (.xls) de l'appliquatif appliqué à la deuxième synthèse hebdomadaire de l'année 2007 (le nombre de radiales est de 1573).

- Colonne 9 : Localisation de la position géographique de la TSM maximale,
- Colonne 10 : Valeur de l'indice d'upwelling

La Fig. 5.8 fourni un exemple de sortie de cet applicatif, appliqué à la deuxième image hebdomadaire de l'année 2007 et décrivant les différentes informations (ou méta-données) contenues dans ce fichier.

Séries spatio-temporelles de l'upwelling

L'objet de l'appliquatif de calcul d'indice d'upwelling, développé sous le langage MatLab, est la production et la cartographie des séries spatio-temporelles à partir des données ASCII (.xls) sauvegarder et archivés lors du calcul de l'indice d'upwelling. Ce mode de présentation permet la constitution des séries spatiales et temporelles de l'indice d'upwelling le long de la côte atlantique marocaine. Parmi les représentations possibles de cet outil :

- Courbes de variations de l'indice d'upwelling à une latitude sélectionnée, en fonction du temps,
- Représentation bidimensionnelle de l'évolution de l'intensité de l'upwelling en fonction de la latitude.

L'exemple de la Fig. 5.9 est une présentation de l'intensité de l'upwelling sous forme d'une courbe couvrant une gamme temporelle de 2 ans. De la même manière, l'exemple de la Fig. 5.10

est une sortie graphique obtenue en spécifiant une requête de visualisation de l'indice d'upwelling et de son extension pour une moyenne temporelle de 2 ans en fonction de la latitude.

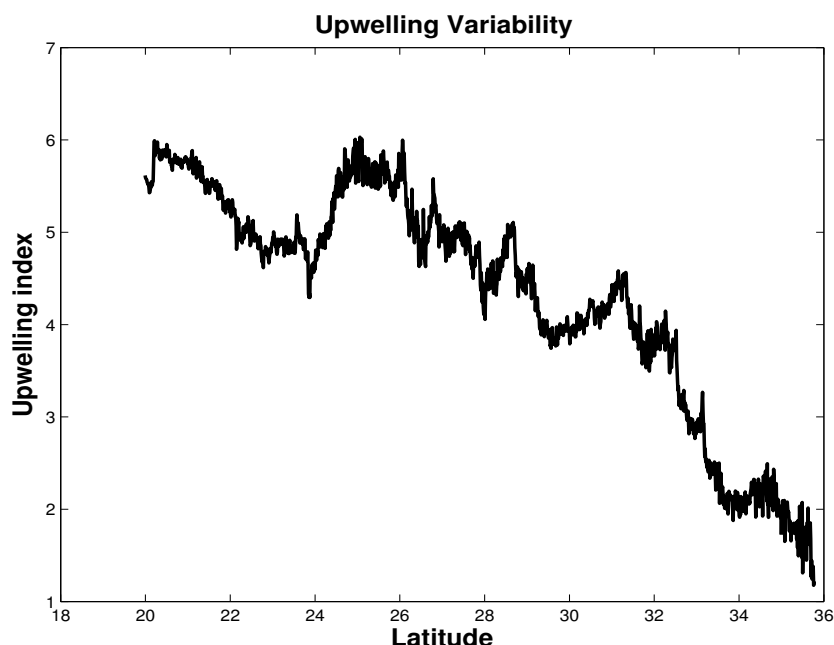


FIGURE 5.9 – Evolution spatiale moyenne des indices d'upwelling (2007-2008).

5.3 Création d'une Base de données pour le suivi et la compréhension de la variabilité spatio-temporelle de l'upwelling

Les différents résultats obtenus à travers l'outil de calcul d'indices d'upwelling (Fig. 5.8, Fig. 5.9 et Fig. 5.10) (ici 2 années de données à titre d'exemple), que ce soit sous forme de tables statistiques ou de graphiques d'évolution, peuvent être utilisées pour suivre la variabilité dans le temps et dans l'espace de l'intensité de l'upwelling. Ces résultats permettent aussi d'analyser l'extension géographique de l'upwelling vers le large ; cette information a été absente dans les modèles de calcul d'indices d'upwelling habituels. En effet, une fois la base de données est bien fournie après traitement de l'ensemble de la série temporelle des images disponibles et couvrant une large période (depuis 1981 à nos jours), il est facile d'analyser et de comprendre l'évolution du phénomène d'upwelling tout au long des côtes atlantiques du Maroc. Cette analyse permet aussi de connaître les périodes de forte intensité et de déclin de ce phénomène, ainsi que les variations géographiques de l'upwelling en fonction des secteurs côtiers à l'image de la situation observée pour la période 2007 et 2008 (Fig. 5.9 et Fig. 5.10).

De plus, les sorties de l'appliquatif s'avèrent d'une grande utilité pour le suivi de la variabilité spatiale et temporelle et présente une réelle solution à la problématique de la grande masse de données satellites thermiques difficile voire impossible à interpréter et à analyser pour définir les tendances des évolutions du phénomène d'upwelling.

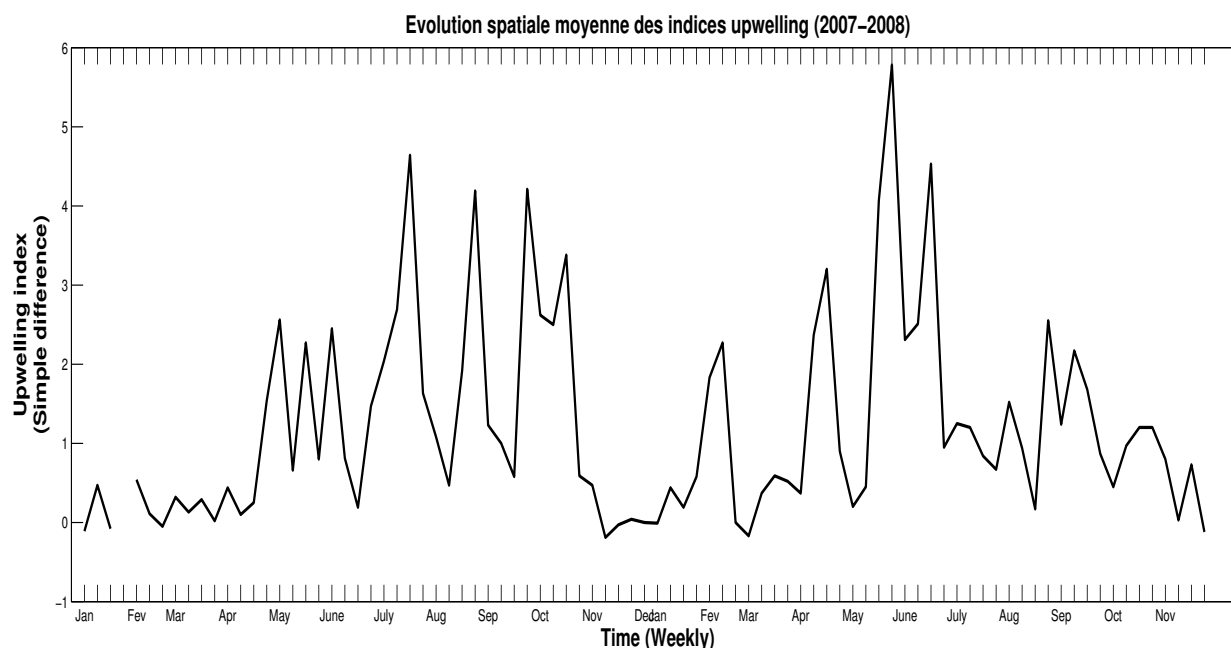


FIGURE 5.10 – Variation temporelle de l'upwelling le long des côtes marocaines (2007-2008).

5.3.1 Variation spatiale moyenne de l'upwelling

Les valeurs de l'indice d'upwelling calculées pour chaque radiale sur une période de deux ans (2007-2008) sont moyennées sous forme d'une seule courbe représentant la variation géographique du phénomène d'upwelling le long des côtes atlantiques du Maroc (Fig. 5.9). D'une manière générale, on distingue 4 régions côtières aux intensités d'upwelling plus ou moins différentes :

- Un premier secteur côtier méridional situé entre les latitudes $20^{\circ}0'$ et $24^{\circ}0'$ Nord où l'upwelling est sensiblement fort. Néanmoins, L'intensité de l'upwelling décroît relativement du sud (latitude $20^{\circ}0'N$) vers le nord (latitude $24^{\circ}0'N$) avec des indices d'upwelling allant respectivement de $6^{\circ}C$ à $4.5^{\circ}C$.
- Une deuxième zone côtière centrale occupant les secteurs côtiers plus larges compris entre les latitudes $24^{\circ}0'N$ et $28^{\circ}0'N$ est caractérisée par un fort indice d'upwelling compris entre 6 et $5^{\circ}C$.
- Une troisième zone côtière est située plus au nord entre les latitudes $28^{\circ}0'N$ et $32^{\circ}0'N$ où l'upwelling connaît une activité moindre par rapport aux secteurs méridionaux. L'indice d'upwelling semble se stabiliser autour de la valeur $4^{\circ}C$ pour constituer une zone de transition de l'activité de l'upwelling vers le nord du pays.
- Une quatrième zone côtière est située plus au nord du Maroc, entre $32^{\circ}0'N$ et $36^{\circ}0'N$ et connaît une nette faiblesse de l'activité des résurgences des eaux froides. Cette faiblesse d'upwelling s'accroît du sud vers l'extrême nord allant de $3.5^{\circ}C$ à $1.2^{\circ}C$.

À la lumière de cette répartition, on peut conclure que la situation moyenne de l'upwelling calculée sur la période de 2007 à 2008 reflète parfaitement, l'état moyenne de la répartition

spatiale relevée par les précédentes études (Atillah et al., 2005; Atillah, 1993; Germa, 2004). En effet, le principal secteur d'activité de l'upwelling se situe au niveau des côtes méridionales du Maroc avec une forte activité dans la zone de Dakhla à Bojdor et une régression généralisée vers les secteurs côtiers nord du pays.

5.3.2 Variabilité temporelle (ex. 2007-2008)

La Fig. 5.10 résume la situation de l'upwelling moyenne (toutes les radiales confondues) pendant les années 2007 et 2008. Un simple examen de l'allure de la courbe moyenne des indices d'upwelling permet de constater que l'intensité de l'upwelling présente une grande variabilité tout au long de ces deux années qui pourrait être reliée à la variation temporelle de conditions de vents qui sont à l'origine de la formation de l'upwelling et de son entretien le long des côtes. En effet, l'activité de l'upwelling semble s'arrêter pendant le premier trimestre de l'année 2007 (valeurs d'indices proches de zéro). Ce n'est qu'au cours du mois d'avril que cette activité reprend timidement pour atteindre une intensité maximale au cours du mois de juin et d'août, malgré une chute inattendue au cours des mois de juillet et de septembre. Néanmoins, l'activité de l'upwelling reprend pendant les premiers mois de l'automne pour atteindre des valeurs de l'ordre de 4°C , avant de chuter à nouveau à la fin du mois de Novembre, chute qui se prolongera jusqu'au mois d'Avril de l'année 2008, malgré une reprise timide à la fin du mois Mars 2008. Néanmoins, la plus forte activité de l'upwelling est notée pendant le mois de mai 2008 (6°C .), contrairement à l'année précédente où le maximum d'activité est atteint un mois plus tôt (avril). Par ailleurs, l'intensité des remontées froides semble s'atténuer dès le mi-juillet pour observer un ralentissement général jusqu'à la fin de l'année.

5.3.3 Variation saisonnière de l'intensité et de l'extension spatiale de l'upwelling

La variation saisonnière moyenne de l'upwelling le long des côtes marocaines méridionales ($20^{\circ}0'$ - $28^{\circ}0'$ Nord), d'une part, et de l'extension spatiale des eaux froides d'autre part, est analysée sur la même période de mesures (2007 et 2008). L'analyse des courbes des indices composant les quatre saisons de l'année (Fig. 5.11), montre d'une manière générale que l'activité de l'upwelling présente la même tendance, avec des indices augmentant du sud vers le nord de la région traitée et cela quelque soit la saison. En effet, toutes les saisons présentent de forts indices dans la zone située entre les latitudes $24^{\circ}0'$ et $26^{\circ}0'$ Nord. Cette activité s'estompe nettement à partir de la latitude $27^{\circ}0'$ Nord, sauf pour les saisons d'été et d'automne où l'activité de l'upwelling se prolonge jusqu'au delà et la limite de la latitude $28^{\circ}0'$ Nord. Cette situation est conforme au constat général de l'évolution de l'upwelling le long des côtes sud du Maroc qui connaît une forte activité pendant cette saison. Néanmoins, en terme d'intensité, la résurgence des eaux froides est beaucoup plus importante pendant la saison automnale au niveau de tous les secteurs côtiers excepté aux alentours de la latitude $27^{\circ}0'\text{N}$ où l'intensité de l'upwelling est légèrement plus élevée en saison estivale. A l'opposé, la courbe du printemps affiche les valeurs d'intensité les plus faibles quelque soit la zone côtière. Il faut dire que cette intensité relative est tributaire du resserrement ou du relâchements des gradients thermiques à l'intérieur des eaux d'upwelling, mais surtout entre les eaux d'upwelling et les eaux chaudes du large, qui dépendent aussi bien du degré de l'activité de l'upwelling que la pression exercée par les eaux chaudes du large.

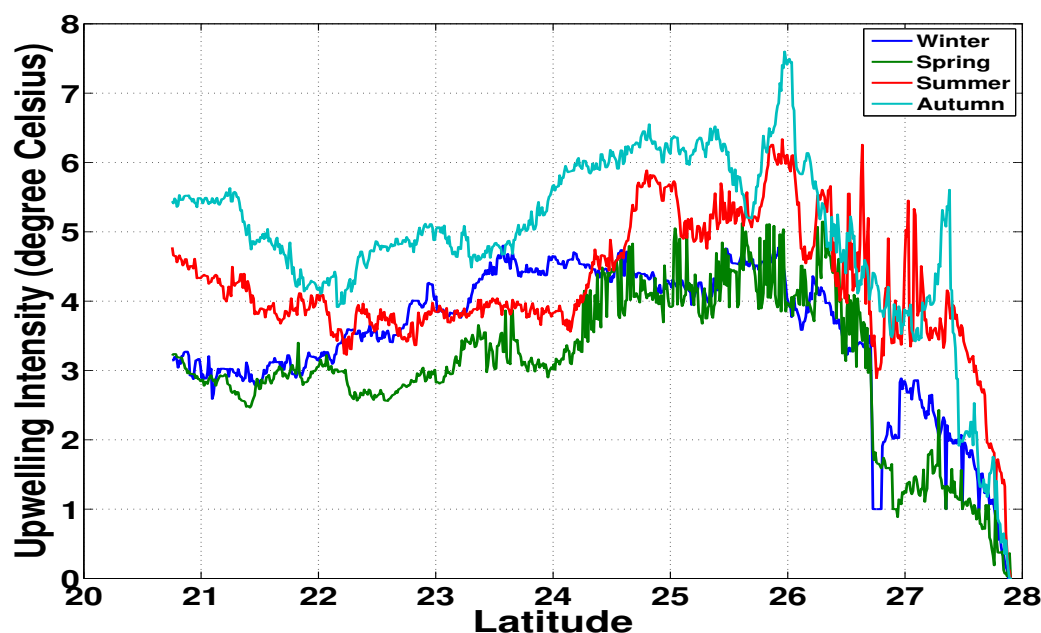


FIGURE 5.11 – Variabilité saisonnière de l'intensité de l'upwelling (2007-2008).

Pour ce qui est de l'extension spatiale de la zone occupée par les eaux froides et déterminée par le front thermique principal qui sépare les eaux chaudes du large des eaux d'upwelling côtières (Fig. 5.12), la répartition saisonnière diffère légèrement de celle de l'intensité de l'upwelling. En effet, la saison d'hiver est la période où l'upwelling s'étend le plus pour occuper une largeur maximale quelque soit la zone côtière considérée et aller parfois jusqu'à 250 km ($22^{\circ}50'N$). Cette extension maximale est en relation directe avec la forte activité de l'anticyclone des Açores pendant cette période de l'année sur cette région du sud du Maroc et qui génère des vents actifs de Nord à Est responsables de l'activité de l'upwelling. Néanmoins, cette extension est variable d'une zone à l'autre et se réduit sensiblement dans la zone comprise entre $23^{\circ}50'N$ Nord et $26^{\circ}0'N$ Nord. En revanche, pendant les saisons du printemps et de l'automne, excepté l'extrême sud de la région pour l'automne et le Nord pour le printemps, l'extension de l'upwelling se rétrécit sensiblement de la même manière. Par ailleurs, la zone d'upwelling est plus large au printemps qu'en automne pour le secteur côtier situé au Nord delà latitude $26^{\circ}0'$. Cette différence est liée justement à la variation des conditions de ventilation entre les différentes zones pendant les périodes du printemps et de l'automne. Lors de la saison estivale, en l'absence ou la faiblesse des vents générateurs d'upwelling à cause du déplacement vers le nord de l'anticyclone des Açores, (laissant place à des vents d'ouest et de Sud-Ouest), l'upwelling se rétrécit alors et occupe des espaces côtiers très limités quelque soit la zone.

Ainsi, les sorties de l'applcatif s'avèrent d'une grande utilité pour le suivi de la variabilité spatiale et temporelle et présente une réelle solution à la problématique de la grande masse de données satellites thermiques difficile voire impossible à interpréter et à analyser pour définir les tendances des évolutions du phénomène d'upwelling.

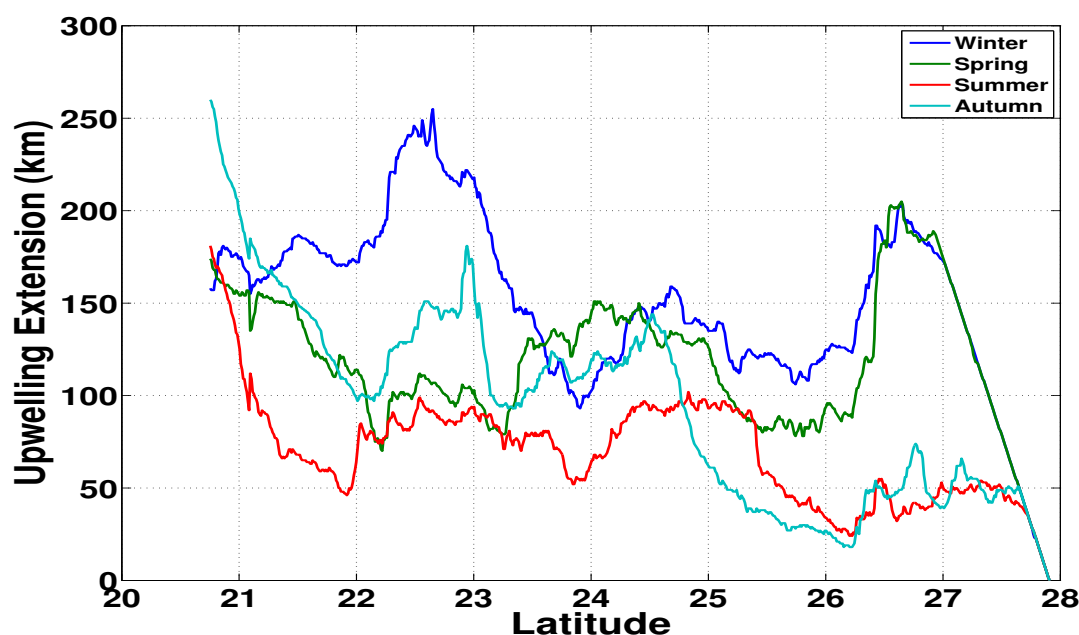


FIGURE 5.12 – Variabilité saisonnière de l'extension de l'upwelling (2007-2008).

5.4 Conclusion

Le suivi du phénomène d'upwelling côtier dans le temps et dans l'espace est rendu possible grâce aux produits issus du traitement des images thermiques satellitaires. En effet, les sorties de l'appliquatif de calcul de l'indice d'upwelling s'avèrent d'une grande utilité pour la compréhension de la variabilité géographique et temporelle et présentent une réelle solution à la problématique de la grande masse de données satellites thermiques difficile voire impossible à interpréter et à analyser pour définir les tendances des évolutions du phénomène d'upwelling. Dès lors, il est facile de caractériser l'évolution des remontées des eaux froides le long des côtes pour une période de donnée pour déterminer les tendances générales de cette évolution et la relier non seulement aux causes probables (variation des vents, effets des changements climatiques,...), mais aussi aux statistiques de pêche pour comprendre l'effet de la variation de l'upwelling sur les fluctuations des ressources halieutiques et déterminer leur relation de cause à effet. L'objectif à terme étant de prévoir les variations des stocks de poissons en fonction de la variabilité de l'intensité de l'upwelling. Par ailleurs, les données d'indices d'upwelling permettent également de s'affranchir de la variabilité moyenne du phénomène d'upwelling le long des côtes et de définir les secteurs côtiers à forte productivité des résurgences. Enfin, les indices d'upwelling sont des excellentes données pour établir les variations saisonnières de l'upwelling et déterminer les secteurs côtiers où l'upwelling est saisonnier en relation avec les variations saisonnières du vent (estival, hivernal...) et les côtes où ce phénomène est permanent ou totalement absent durant toute l'année. Il faut noter que ce type de suivi dans le temps et dans l'espace est une opération fastidieuse et difficile à réaliser à partir des données de campagnes océanographiques, en raison de l'absence ou de l'insuffisance de ces données pour couvrir l'ensemble des eaux d'upwelling côtier, d'une part, et une période longue pour dériver

des tendances d'évolution objectives d'autre part. Par ailleurs, grâce à la disponibilité des données satellite quotidiennement et en temps réel, ce processus de suivi va informer sur la situation actuelle de l'upwelling qui pourra aider à prendre des décisions en temps opportun.

Ces produits ont servis aussi bien à localiser et détecter les structures thermiques intéressant à la surface de la mer qu'à suivre leurs variations spatio-temporelles. La grande couverture spatiale et temporelle des images de TSM issus du capteur NOAA-AVHRR offre notamment une représentation synoptique des fronts thermique et un suivi dans le temps de l'évolution du phénomène d'upwelling sur la côte atlantique marocaine, que ne peuvent réaliser les compagnes océanographiques traditionnelles lourdes et plus coûteuse. Cette étude a permis de détecter les régions où l'upwelling est permanent tout au long de l'année et les régions où se phénomène présente une apparition saisonnière en fonction de saisonnalité des condition de ventilation. Cette étude permet aussi de confirmer les grands faits déjà mentionnés en littérature sur la région du sud du Maroc. L'extension de l'upwelling est très variable d'une saison à l'autre avec une intensité qui prend les mêmes valeurs selon le rythme annuel. A partir du logiciel développé au sein de ce travail, il a été possible de localiser avec précision les aires d'upwelling dans les images de TSM et ainsi générer des résultats des cartographies temporelles compréhensibles et faciles à interpréter.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons tenté, à travers les outils de traitement et d'analyse des images satellites de température de surface de la mer, de caractériser et de comprendre les structures thermiques océanographiques, notamment celles liées au phénomène d'upwelling, souvent complexes et difficiles à identifier. La localisation et la compréhension de ces structures sont considérées comme des informations essentielles pour suivre et maîtriser la dynamique spatiale et temporelle des océans, ainsi que dans la gestion des stocks de poissons.

Ainsi, le recours aux méthodes de traitement d'image et de vision par ordinateur, notamment les méthodes de classification non-supervisée (chapitre 3) et les méthodes de détection des variations les plus singulières (fronts thermiques) en utilisant le formalisme multifractal micro-canonique (chapitre 4), et leur application aux aires d'upwelling côtier du Maroc a permis de mettre en évidence les principaux événements qui caractérisent les eaux froides de surface associées au phénomène d'upwelling. Ainsi, par exemple, si les mesures océanographiques traditionnelles, basées souvent sur l'interpolation des données des campagnes en mer, ne renseignent pas suffisamment sur des structures fines de la mer, en revanche les approches objectives et automatiques développées sur les images satellites ont pu s'affranchir de la multiplication de ces structures, particulièrement les fronts thermiques, principaux ou secondaires associées à l'intensité de l'activité de l'upwelling.

En effet, la présente étude a pu mettre en oeuvre une série d'approches pour concevoir des outils efficaces et faciles d'utilisation afin d'extraire des informations souvent dissimulées dans les images de température de surface de la mer et qui renseignent sur l'état et la dynamique de l'upwelling côtier. En premier lieu, une série de méthodes classiques de traitement d'image, telles que la méthode d'Otsu, k-means, Fuzzy c-means, Gustafson-Kessel, accroissement de régions ... etc., ont été testées pour circonscrire les aires exactes occupées par les eaux froides d'upwelling. Les atouts et les limitations de chaque méthode ont été mis en évidence par le biais, notamment, de l'analyse et de l'évaluation des résultats de chacune de ces méthodes par des océanographes, sur une grande série d'images traitées. A la lumière de ces analyses, la méthode de segmentation d'Otsu a été préférée pour identifier et localiser l'extension spatiale de l'upwelling. Néanmoins, la solution préconisée reposait parfois sur la combinaison de deux ou plusieurs méthodes.

Par ailleurs, et en deuxième lieu, l'étude s'est intéressée à l'application du formalisme multifractal (FMM) pour le calcul des exposants de singularités sur les images TSM pour dériver les principales propriétés physiques caractérisant l'upwelling et contenues dans l'image thermique. En effet, l'outil du formalisme multifractal est utilisé dans notre cas, principalement

pour analyser la turbulence et l'intermittence associées à l'activité du phénomène d'upwelling. La richesse et la finesse des résultats obtenus, notamment pour la caractérisation des fronts d'upwelling, témoignent de l'intérêt et de l'utilité de cette technique pour analyser les milieux turbulents et instables tels que les régions d'upwelling et les fronts thermiques associés.

Enfin, un applicatif de calcul des indices d'upwelling a été mis à jour et amélioré en y intégrant de nouveaux paramètres pour s'affranchir de la situation réelle de l'upwelling. Cet outil fait appel justement aux fronts thermiques, séparant les eaux chaudes des eaux froides, et dérivés par les méthodes développées dans cette étude. Ces fronts permettent de circonscrire les aires exactes qu'occupe l'upwelling où il faut chercher la valeur thermique minimale le long d'une radiale (zone d'upwelling) et la valeur maximale (en dehors d'upwelling) requises par la méthode de calcul de l'indice d'upwelling. Par ailleurs, ce front permet en plus de définir la largeur qu'occupe chaque upwelling le long de chaque radiale. Cet applicatif opérationnel produisant des indices de présence, d'intensité et de largeur d'upwelling dans le temps et dans l'espace permettant le suivi de la dynamique du phénomène d'upwelling tout au long des côtes du Maroc. Ainsi, l'analyse de la variabilité spatio-temporelle (saisonnière et interannuelle) est rendue possible pour déterminer les zones à upwelling permanent ou saisonnier, les périodes de fort développement ou de déclin d'upwelling. Ces résultats peuvent être mis en corrélation avec les données de pêches pour comprendre l'impact de la variabilité du phénomène d'upwelling sur les fluctuations des stocks de poissons.

En guise de perspectives et de suites de ce travail, plusieurs axes de recherche sont identifiés pour approfondir la caractérisation et l'analyse du phénomène d'upwelling marocain et mettre en évidence l'apport de l'imagerie satellite dans ce domaine. Parmi ces axes, il serait très intéressant de détecter et discriminer les différentes structures thermiques composant l'upwelling marocain (i.e. fronts, filaments et tourbillons) ainsi que leurs propriétés et leurs différences par rapport aux autres systèmes d'upwelling. Il serait aussi très utile de mettre en évidence l'activité de l'upwelling par le biais de l'analyse fréquentielle des fronts thermiques produit dans cette étude pour identifier les zones à forte productivité marine. Par ailleurs, ces résultats peuvent être reliés aux statistiques de pêche pour calculer le poids de la variation de l'upwelling sur les fluctuations des ressources halieutiques dans la perspective d'en prévoir l'évolution. Enfin, il serait très intéressant de compléter cette étude par l'intégration des données de la couleur de l'eau qui fournissent des informations sur la concentration chlorophyllienne qui caractérisent les upwellings et comprendre leur effet sur l'abondance ou le déclin des ressources poissonnières du pays.



BIBLIOGRAPHIE

- Acton, S. T. (1996). On unsupervised segmentation of remotely sensed imagery using nonlinear regression. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7) :1407–1415.
- Atillah, A. (1993). *Les influences maritimes sur le climat du Maroc atlantique central. Une analyse par télédétection spatiale*. PhD thesis, Iniversité de Rennes.
- Atillah, A., Orbi, A., Hilmi, K., and Mangin, A. (2005). Produits opérationnels d’océanographie spatiale pour le suivi et l’analyse du phénomène d’upwelling marocain. *Geo-Observateur*, 14 :49–62.
- Bakun, A. (2006). Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae : Opportunity, adaptative response and competitive advantage. *Scientia Marina*, 70(S2) :105–122.
- Ballard, D. H. and Brown, C. M. (1982). *Computer Vision*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, pp. 186-188.
- Belkin, I. M. and O’Reilly, J. E. (2009). An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery. *Journal of Marine Systems*, 78(3) :319 – 326.
- Bezdek, J. (1983). Fuzzy algorithms for pattern recognition. *Defense Technical Information Center*.
- Bezdek, J. C. (1981). *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA.
- BRODEUR, R. D. and WARE, D. M. (1992). Long-term variability in zooplankton biomass in the subarctic pacific ocean. *Fisheries Oceanography*, 1(1) :32–38.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, PAMI-8(6) :679–698.
- Cassanet, J. (1981). *Etude par teledetection des temperatures et turbidites des eaux au large de la Loire Atlantique*. Ecole normale superieure : Collection de l’Ecole normale superieure de jeunes filles.
- Castaing, B. (1996). The temperature of turbulent flows. *J. Phys. II France*, 6(1) :105–114.

- Cayula, J. F. and Cornillon, P. (1992). Edge detection algorithm for SST images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 9(1) :67–80.
- Cayula, J.-F., Cornillon, P., Holyer, R., and Peckinpaugh, S. (1991). Comparative study of two recent edge-detection algorithms designed to process sea-surface temperature fields. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 29(1) :175–177.
- Chang, Y.-L. and Li, X. (1994). Adaptive image region-growing. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 3(6) :868–872.
- Chassot, E., Bonhommeau, S., Reygondeau, G., Nieto, K., Polovina, J. J., Huret, M., Dulvy, N. K., and Demarcq, H. (2011). Satellite remote sensing for an ecosystem approach to fisheries management. *Ices Journal of Marine Science*, 68 :651–666.
- Coll, C. and Caselles, V. (1997). A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data : Validation and algorithm comparison. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 102(D14) :16697–16713.
- Davies, D. L. and Bouldin, D. W. (1979a). A cluster separation measure. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, PAMI-1(2) :224–227.
- Davies, D. L. and Bouldin, D. W. (1979b). A cluster separation measure. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, PAMI-1(2) :224–227.
- Demarcq, H. and Faure, V. (2000). Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite sst. application to octopus vulgaris recruitment. *Oceanologica Acta*, 23(4) :391 – 408.
- Diersling, N. (2012). Phytoplankton blooms : The basics (PDF). NOAA FKNMS. Retrieved 26 december 2012. Technical report.
- Duda, R. O. and Hart, P. E. (1973). *Pattern Classification and Scene Analysis*. John Willey & Sons, New York.
- Dunn, J. C. (1973). A fuzzy relative of the isodata process and its use in detecting compact well-separated clusters. *Journal of Cybernetics*, 3(3) :32–57.
- Eduscol (2006). La terre planete oceane. <http://eduscol.education.fr/obter/appliped/ocean/theme/ocean31.htm>.
- Ekman, V. W. (1905). On the influence of the earth’s rotation on ocean currents. *Arkiv for matematik, astronomi och fysik, Stockholm*, 2(11) :131–141.
- EOEdu (2010). Systeme mondiale d’observation par satellite. <http://eoedu.belspo.be/fr/satellites/index-meteo.htm>.
- Forgy, E. (1965). Cluster analysis of multivariate data : Efficiency versus interpretability of classification. *Biometrics*, 21(3) :768–769.
- Frisch, U. (1995). *Turbulence : The legacy of A.N. Kolmogorov*. Cambridge University Press.

- Frisch, U. and Parisi, G. (1985). On the singularity structure of fully developed turbulence. In Gil, M., Benzi, R., and Parisi, G., editors, *Turbulence and Predictability in Geophysical Fluid Dynamics and Climate Dynamics*, pages 84–88, Amsterdam, North-Holland. Elsevier.
- Fukuyama, Y., Sugeno, M., and Martin, T. (1989). A new method of choosing the number of clusters for the fuzzy c-means method. In *in : Proceedings Fifth Fuzzy Systems Symp*, pages 247–250.
- Germa (2004). Rapport technique et scientifique de l'action upwelling du projet GERMA (Gestion des Ressources Marines). Technical report.
- Glove (2002). Architecture de la chaine de traitement AVHRR de niveau 3. Technical Report 6.
- Guerrero-Bote, V. P., Lopez-Pujalte, C., de Moya-Anegon, F., and Herrero-Solana, V. (2003). Comparison of neural models for document clustering. *International Journal of Approximate Reasoning*, 34(2-3) :287 – 305. Soft Computing Applications to Intelligent Information Retrieval on the Internet.
- Guillot, B. (1981). *Les satellites de l'environnement : description sommaire de la série TIROS-N/NOAA-A.I.* Initiations-Documentations Techniques : Télédétection. ORSTOM.
- Gustafson, D. and Kessel, W. (1978). Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix. In *Decision and Control including the 17th Symposium on Adaptive Processes, 1978 IEEE Conference on*, pages 761–766.
- Haralick, R. (1979). Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*, 67(5) :786–804.
- Harlow, C. A., Trivedi, M. M., and Connors, R. W. (1986). Use of texture operators in segmentation. *Optical Engineering*, 25(11) :251200–251200.
- Hartigan, J. (1975). *Clustering Algorithms*. Wiley, New York.
- Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7 :1417–1434.
- Holyer, R. J. and Peckinpaugh, S. H. (1989). Edge detection applied to satellite imagery of the oceans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(1) :46–56.
- Höppner, F. and Klawonn, F., Kruse, R., and unkler, T. (1999). *Fuzzy Cluster Analysis-Methods for Classification : Data Analysis and Image Recognition*. John Wiley & Sons, LTD,.
- Jain, A. (1989). *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice Hall, New York.
- Jain, A. K. and Dubes, R. (1978). Feature definition in pattern recognition with small sample size. *Pattern Recognition*, 10(2) :85–97.
- Jain, A. K., Murty, M. N., and Flynn, P. J. (1999). Data clustering : A review. *ACM Comput. Surv.*, 31(3) :264–323.

- Jennings, S., Kaiser, M., and Reynolds, J. (2001). *Marine Fisheries Ecology*. Wiley.
- Kwon, S. (1998). Cluster validity index for fuzzy clustering. *Electronics Letters*, 34 :2176–2177(1).
- Lalli, C. M. and Parsons, T. R. (1997). Page x. In *Biological Oceanography : An Introduction (Second Edition)*, pages X –. Butterworth-Heinemann, Oxford, second edition edition.
- Leski, J. (2003). Towards a robust fuzzy clustering. *Fuzzy Sets and Systems*, 137(2) :215 – 233.
- Liao, P.-S., Chen, T.-S., and Chung, P.-C. (2001). A fast algorithm for multilevel thresholding. *Journal of Information Science and Engineering*, 17 :713–727.
- Longstaff, D., Walker, R., Walker, R. F., Jackway, P., and Jackway, P. (1995). Improving co-occurrence matrix feature discrimination. In *Proc. of DICTA'95, 3rd International Conference on Digital Image Computing : Techniques and Applications*, pages 643–648.
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1 : Statistics*, pages 281–297, Berkeley, Calif. University of California Press.
- Maji, S. K. and Yahia, H. M. (2014). Edges, transitions and criticality. *Pattern Recognition*, 47(6) :2104 – 2115.
- Maji, S. K., Yahia, H. M., and Badri, H. (2013). Reconstructing an image from its edge representation. *Digital Signal Processing*, 23(6) :1867 – 1876.
- Mann, K. and Lazier, J. (1996). *Dynamics of Marine Ecosystems : Biological-Physical Interactions in the Oceans Second Edition*. Wiley.
- Marcello, J., Marques, F., and Eugenio, F. (2005). Automatic tool for the precise detection of upwelling and filaments in remote sensing imagery. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 43(7) :1605–1616.
- Matheron, G. (1975). *Random Sets and Integral Geometry*. Wiley, New York.
- MeteoFrance (2010). Les capteurs embarqués sur les satellites. <http://education.meteofrance.fr/dossiers-thematiques/observer-et-mesurer/1-atmosphere/les-capteurs-embarques-sur-les-satellites>.
- Metzner, M. and Hennings, I. (1995). Interpretation of dynamical processes in the upwelling area off northwest africa using simulated and remotely sensed data. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS*, volume 2, pages 1101–1103. IEEE.
- Nascimento, S. and Franco, P. (2009). Segmentation of upwelling regions in sea surface temperature images via unsupervised fuzzy clustering. In Corchado, E. and Yin, H., editors, *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2009*, volume 5788 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 543–553. Springer Berlin Heidelberg.

- Nascimento, S., Franco, P., Sousa, F., Dias, J., and Neves, F. (2012). Automated computational delimitation of SST upwelling areas using fuzzy clustering. *Computers and Geosciences*, 43 :207–216.
- Nieto, K., Demarcq, H., and McClatchie, S. (2012). Mesoscale frontal structures in the canary upwelling system : New front and filament detection algorithms applied to spatial and temporal patterns. *Remote Sensing of Environment*, 123(0) :339–346.
- Nieves, V., Llebot, C., Turiel, A., Solé, J., García-Ladona, E., Estrada, M., and Blasco, D. (2007). Common turbulent signature in sea surface temperature and chlorophyll maps. *Geophysical Research Letters*, 34(23) :n/a–n/a. L23602.
- Nykjear, L. and Van Camp, L. (1994). Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along northwest africa and portugal from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 99(C7) :14197–14207.
- Nykjear, L., Van Camp, L., Hilmi, K., and Mangin, A. (1992). Interannual variability of upwelling indices along the northwest african coast. *Geo-Observateur, Rabat, Maroc*, (N° Spécial Marisy 92) :176–179.
- Oram, J. J., McWilliams, J. C., and Stolzenbach, K. D. (2008). Gradient-based edge detection and feature classification of sea-surface images of the southern california bight. *Remote Sensing of Environment*, 112(5) :2397 – 2415.
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 9 :62–66.
- Paul, S., Alouges, A., Bonneral, H., and pontier, L. (1982). *Dictionnaire de télédétection aérospatiale*. MASSON, Paris, 236 pages.
- Perona, P. and Malik, J. (1990). Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 12(7) :629–639.
- Pont, O., Turiel, A., and vincente Conard J., P. (2011). On optimal wavelet bases fro the realization of microcanonical cascade processes. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, 09(01) :35–61.
- Pont, O., Turiel, A., and Yahia, H. (2013). Singularity analysis of digital signals through the evaluation of their unpredictable point manifold. *International Journal of Computer Mathematics*, 90(8) :1693–1707.
- Serra, J. (1982). *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, London.
- Simhadri, K., Iyengar, S., Holyer, R., Lybanon, M., and Zachary, J.M., J. (1998). Wavelet-based feature extraction from oceanographic images. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 36(3) :767–778.
- Sousa, F. M., Nascimento, S., Casimiro, H., and Boutov, D. (2008). Identification of upwelling areas on sea surface temperature images using fuzzy clustering. *Remote Sensing of Environment*, 112(6) :2817 – 2823.

- Stowe, L. L., Davis, P. A., and McClain, E. P. (1999). Scientific basis and initial evaluation of the CLAVR-1 Global Clear/Cloud classification Algorithm for the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(6) :656.
- Tamim, A., Minaoui, K., Daoudi, K., Atillah, A., and Aboutajdine, D. (2014a). On detectability of moroccan coastal upwelling in sea surface temperature satellite images. In Bebis, G., Boyle, R., Parvin, B., Koracin, D., McMahan, R., Jerald, J., Zhang, H., Drucker, S., Kambhamettu, C., El Choubassi, M., Deng, Z., and Carlson, M., editors, *Advances in Visual Computing*, volume 8888 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 386–395. Springer International Publishing.
- Tamim, A., Minaoui, K., Daoudi, K., Atillah, A., and Aboutajdine, D. (2015a). Detection of moroccan coastal upwelling in sst images using the expectation-maximization. In *ISVC 2015*, The first International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV), Fez, Morocco.
- Tamim, A., Minaoui, K., Daoudi, K., Atillah, A., Yahia, H., and Aboutajdine, D. (2014b). Upwelling detection in sst images using fuzzy clustering with adaptive cluster merging. In *ISIVC 2014*, The eighth edition of International Symposium on signal, Image, Video and Communications (ISIVC), Marrakech, Morocco.
- Tamim, A., Minaoui, K., Daoudi, K., Atillah, A., Yahia, H., Aboutajdine, D., and Smiej, M. (2014c). A simple tool for automatic extraction of moroccan coastal upwelling from sea surface temperature images. In *Intelligent Systems : Theories and Applications (SITA-14)*, 2014 9th International Conference on, pages 1–4.
- Tamim, A., Minaoui, K., Daoudi, K., Yahia, H., Atillah, A., and Aboutajdine, D. (2015b). An efficient tool for automatic delimitation of moroccan coastal upwelling using sst images. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 12(4) :875–879.
- Tamim, A., Minaoui, K., Daoudi, K., Yahia, H., Atillah, A., Smiej, M. F., and Aboutajdine, D. (2013). A simple and efficient approach for coarse segmentation of Moroccan coastal upwelling. In *Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2013 Proceedings of the 21st European, pages 1–5.
- Tamim, A., Yahia, H., Daoudi, K., Minaoui, K., Atillah, A., Aboutajdine, D., and Smiej, M. F. (2015c). Detection of moroccan coastal upwelling fronts in {SST} images using the microcanonical multiscale formalism. *Pattern Recognition Letters*, 55(0) :28 – 33.
- Turiel, A. (2008). Method and system for the singularity analysis of digital signals. *patent registered under number pct/es2008/070195*.
- Turiel, A., Yahia, H., and Perez-Vicente, Conrad, J. (2008). Microcanonical multifractal formalism—a geometrical approach to multifractal systems : Part i. singularity analysis. *Journal of Physics A : Mathematical and Theoretical*, 41 :015501–015536.
- UVED (2006). Les forçages atmosphériques. http://www.uved.fr/fileadmin/user_upload/modules_introductifs/module2/site/html/m2c2_m2c2p2_m2c2p2sp4_1.html.

-
- UVED (2008). Le spectre électromagnétique. <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-4-spectre-electromagnetique.html>.
- Vliet, L. J. V., Young, I. T., and Beckers, G. L. (1989). A nonlinear laplace operator as edge detector in noisy images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 45(2) :167 – 195.
- Wald, L. (1980). *Utilisation du satellite NOAA-5 à la connaissance de la thermique océanique. Etude de ses variations saisonnières en Mer Ligure et de ses variations spatiales en Méditerranée*. Université Pierre et Marie Curie.
- Wang, W. and Zhang, Y. (2007). On fuzzy cluster validity indices. *Fuzzy Sets and Systems*, 158(19) :2095 – 2117. Theme : Data Analysis.
- Wikimedia, C. (2011). Upwelling-labels. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Upwelling-labels-en.svg>. File : Upwelling-labels-en.svg.
- Wooster, W., Bakun, A., and McLain, D. (1976). The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *Journal of Marine Research*, 34(2) :131–141.
- Wu, K.-L. and Yang, M.-S. (2005). A cluster validity index for fuzzy clustering. *Pattern Recognition Letters*, 26(9) :1275–1291.
- Xie, X. L. and Beni, G. (1991). A validity measure for fuzzy clustering. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 13(8) :841–847.
- Xu, Y. and Brereton, R. (2005). A comparative study of cluster validation indices applied to genotyping data. *Chemometrics Intell. Lab. Systems*, 78(1-2) :30–40. Publisher : Elsevier B.V.
- Yahia, H., Sudre, J., Pottier, C., and Garçon, V. (2010). Motion analysis in oceanographic satellite images using multiscale methods and the energy cascade. *Pattern Recognition*, 43(10) :3591 – 3604.
- Yelekci, O., Charria, G., Mawren, D., Capet, X., Reverdin, G., Gohin, F., Sudre, J., and Yahia, H. (2014). Observing submesoscale activity in the bay of biscay with satellite-derived sst and chlorophyll concentration. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 16 of *EGU General Assembly Conference Abstracts*, page 6952.
- Zahid, N., Limouri, M., and Essaid, A. (1999). A new cluster-validity for fuzzy clustering. *Pattern Recognition*, 32(7) :1089 – 1097.
- Zhang, Y., Godin, M., Bellingham, J., and Ryan, J. (2012). Using an autonomous underwater vehicle to track a coastal upwelling front. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 37(3) :338–347.